

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مغناطیس سنجی

تخمین عمق کوری با استفاده از آنالیز طیفی داده های مغناطیس هوابرد جهت اکتشاف مناطق مستعد
منابع زمین گرمایی شمال غرب ایران

نگارنده:

پیوند حیدرنژاد صنمی

استاد راهنما:

دکتر علی نجاتی کلاته

مشاور:

دکتر هانی متولی عنبران

بهمن ۱۳۹۵

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایشار و از خودگذشتگی
به پاس عاطفه سرشار و کرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است
به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرکردانی و ترس در پناہشان به شجاعت می گراید
و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند
این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم

شکر و قدردانی

شکرشایان نثار ایزدمنان که توفیق را رفیق را هم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از
بزرگوار جناب آقای دکتر علی نجاتی کلاته به عنوان استاد راهنما که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت
خود قرار داده اند و همچنین محکم های بی دریغ دکترانی متولی عنبران کمال شکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب پیوند حیدرنژاد صنمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته‌ی ژئوفیزیک گرایش ژئومغناطیس از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: تخمین عمق کوری با استفاده از آنالیز طیفی داده‌های مغناطیس‌هوابرد جهت اکتشاف مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی شمال غرب ایران تحت راهنمایی جناب آقای دکتر علی نجاتی کلاته متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تاثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از این پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) مربوط به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

انرژی زمین گرمایی می تواند جایگزین مناسبی برای سوخت های فسیلی و هسته ای باشد. از این رو اکتشاف مناطق مستعد منابع زمین گرمایی کمک شایانی به روند تامین انرژی می کند. آنالیز طیفی داده های مغناطیس هوابرد جهت تخمین عمق کوری به دلیل گستره ی وسیع مطالعه، اطلاعات با ارزشی در اکتشافات مقدماتی ارائه می کند. عمق نقطه ی کوری عمقی است که در آن درجه حرارت سنگ های پوسته زمین به حدی بالا می رود که خاصیت مغناطیسی خود را از دست می دهند. تخمین تغییرات همدمای کوری یک منطقه می تواند اطلاعات ارزشمندی از توزیع دمایی در عمق و تمرکز انرژی زمین گرمایی در زیر سطح زمین ارائه دهد. روش های رایجی که جهت تخمین عمق نقطه ی کوری در مناطق مختلف دنیا مورد استفاده قرار می گیرد اکثراً مغناطیدگی سنگ های پوسته را به عنوان یک تابع تصادفی در نظر می گیرند. این در حالی است که مغناطیدگی پوسته رفتار فرکتالی دارد. به همین دلیل در این پایان نامه سعی بر این است که عمق نقطه ی کوری با فرض رفتار فرکتالی مغناطیدگی سنگ های پوسته تخمین زده شود. برای انجام این کار ابتدا نقشه ی شدت کل میدان مغناطیسی شمال غرب ایران تهیه شد. بعد از آماده سازی نقشه ی شدت میدان مغناطیسی کل، منطقه را به ۱۱ پنجره با ابعاد 100×100 کیلومتر مربع تقسیم کردیم. سپس طیف توان میانگین شعاعی برای هر پنجره محاسبه شد. سپس با استفاده از روش های مختلف عمق بالا، متوسط، کف و پارامتر فرکتالی تخمین زده شد. نتایج نشان می دهد عمق بالای بی هنجاری های مغناطیسی بین $2/5$ تا $5/9$ کیلومتر، پارامتر فرکتالی بین $2/1$ تا 3 ، و عمق نقطه ی کوری بین $9/8$ تا $16/8$ کیلومتر است. سپس با تهیه و بررسی نقشه های عمق کوری، گرادیان حرارتی و جریان حرارتی این نتیجه حاصل شد که تمام منطقه دارای پتانسیل برای اکتشافات بعدی می باشد.

واژگان کلیدی: عمق نقطه ی کوری، زمین گرمایی، پارامتر فرکتالی، طیف توان میانگین شعاعی، گرادیان حرارتی، جریان حرارتی.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- تاریخچه‌ی انرژی زمین‌گرمایی در جهان و ایران	۲
۳-۱- اکتشاف منابع زمین‌گرمایی	۴
۴-۱- روش مغناطیس‌سنجی هوابرد و تعیین عمق نقطه‌ی کوری	۶
۵-۱- ضرورت انجام تحقیق	۸
۶-۱- هدف مطالعه و روش تحقیق	۱۰
۷-۱- ساختار پایان نامه	۱۱
فصل دوم: مروری بر روش‌های تخمین عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی.....	۱۳
۱-۲- مقدمه	۱۴
۲-۲- مدل‌های مغناطیسی تصادفی	۱۵
۱-۲-۲- مقدمه	۱۵
۲-۲-۲- روش اسپکتور و گرنت	۱۵
۳-۲-۲- روش پیک طیفی	۱۷
۴-۲-۲- روش مدل سازی پیشرو	۱۸
۵-۲-۲- روش مرکزبایی	۲۰
۳-۲- روش طیف مقیاس بندی شده یا فراکتالی	۲۱
۱-۳-۲- روش مرکز بایی اصلاح شده	۲۲
۴-۲- روش تخمین عمق با طیف دی- فرکتال شده	۲۳
۵-۲- استفاده از موجک پیوسته و روشهای وارون سازی	۲۵
۶-۲- مروری بر محاسبه‌ی عمق نقطه‌ی کوری و تهیه‌ی نقشه‌ی جریان حرارتی در مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی	۲۵
۱-۶-۲- تخمین عمق نقطه‌ی کوری و تهیه‌ی نقشه‌های گرادیان و جریان حرارتی در منطقه‌ی آناتولیا، ترکیه	۲۶
فصل سوم: کاربرد روش‌های مرکزبایی، مدل سازی پیشرو و طیف دی-فرکتال شده روی مثال مصنوعی.....	۳۳
۱-۳- مقدمه	۳۴
۲-۳- مشخصات مدل مصنوعی	۳۴
۳-۳- روش مرکزبایی	۳۶
۴-۳- روش مدل سازی پیشرو	۳۷
۵-۳- روش تخمین عمق با طیف دی-فرکتال شده	۳۸
۶-۳- مقایسه و نتیجه‌گیری	۴۵
فصل چهارم: تخمین عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی شمال غرب ایران.....	۴۹

۵۰	۱-۴ - مقدمه
۵۰	۲-۴ - موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه و زمین‌شناسی شمال غرب ایران
۵۵	۳-۴ - داده‌ها و پنجره‌گذاری
۵۵	۱-۳-۴ - نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی
۵۶	۲-۳-۴ - تصحیح داده‌ها
۵۸	۲-۳-۴ - انتخاب پنجره
۶۱	۴-۴ - طیف توان شعاعی
۶۲	۱-۴-۴ - آماده سازی و پردازش پنجره
۶۵	۲-۴-۴ - محاسبه‌ی طیف توان میانگین شعاعی
۶۵	۵-۴ - تخمین عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی (عمق نقطه‌ی کوری)
۶۶	۱-۵-۴ - تخمین عمق به روش مرکزیابی
۶۸	۲-۵-۴ - تخمین عمق به روش مدل سازی پیشرو
۷۰	۳-۵-۴ - تخمین عمق با روش طیف دی-فرکتال شده
۷۲	۶-۴ - نتیجه‌گیری
۷۵	فصل پنجم: تهیه نقشه‌های عمق کوری، گرادیان حرارتی و جریان حرارتی شمال غرب ایران
۷۶	۱-۵ - مقدمه
۷۶	۲-۵ - تهیه نقشه‌ی عمق نقطه‌ی کوری
۷۹	۳-۵ - تهیه نقشه‌ی گرادیان حرارتی
۸۰	۴-۵ - تهیه نقشه‌ی جریان حرارتی
۸۲	۵-۵ - نتیجه‌گیری
۸۳	۶-۵ - اعتبار سنجی
۸۵	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۸۶	۱-۶ - مقدمه
۸۶	۲-۶ - نتیجه‌گیری
۸۷	۳-۶ - پیشنهادات
۸۹	منابع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) اولین دستگاه که با انرژی زمین گرمایی کار می کرد، لئوناردو، ایتالیا، ۱۹۰۴..... ۳
- شکل (۲-۱) نقشه‌ی پتانسیل سنجی انرژی زمین گرمایی ایران..... ۴
- شکل (۳-۱) نمایش یک سیستم زمین گرمایی..... ۵
- شکل (۴-۱) میزان تولید برق تولید شده در دنیا با تفکیک نوع سوخت مصرفی..... ۹
- شکل (۵-۱) میزان تولید دی اکسید کربن بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰..... ۹
- شکل (۱-۲) تحلیل طیفی انجام شده توسط اسپکتور و گرنت. h عمق بالای لایه و t ضخامت لایه..... ۱۷
- شکل (۲-۲) بهبود تخمین عمق روش اسپکتور و گرنت با استفاده از تصحیح قانون توان. دوائر کوچک روی خط بیان گر عمق بهبود یافته می باشد. تخمین‌های روش اسپکتور و گرنت با علامت X مشخص شده‌اند..... ۱۸
- شکل (۳-۲) مثالی از مدل سازی پیشرو. طیف فوریه (خط پیوسته) و طیف حاصل از مدل سازی پیشرو (خط چین). خط راست در بازه $0/1-0/3$ عدد موج، محاسبه عمق را بر اساس روش اسپکتور و گرنت نشان می‌دهد..... ۱۹
- شکل (۴-۲) نمودارگردشی روش دی-فرکتال شده جهت تخمین عمق کف پوسته‌ی مغناطیسی..... ۲۴
- شکل (۸-۲) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی باقیمانده آناتولیا. فاصله‌ی کنتورها ۵۰ نانو تسلا. علامت + مرکز پنجره‌ها را نمایش می‌دهد..... ۲۷
- شکل (۹-۲) تخمین عمق بالا (الف). تخمین عمق متوسط (ب). پنجره‌ی شماره‌ی ۱۶..... ۲۸
- شکل (۱۰-۲) نقشه‌ی عمق هم‌دمای کوری آناتولیا، ترکیه (فاصله خطوط تراز ۱/۵ کیلومتر)..... ۲۹
- شکل (۱۱-۲) نقشه‌ی گرادیان حرارتی آناتولیا، ترکیه (فاصله خطوط تراز $7^{\circ}C/km$ می باشد)..... ۳۰
- شکل (۱۲-۲) نقشه‌ی جریان حرارتی آناتولیا، ترکیه (فاصله خطوط تراز $10mW/m^2$ می باشد)..... ۳۱
- شکل (۱-۳) نمودار لگاریتم طیف توان میانگین شعاعی - عدد موج حاصل از شکل (۱-۳)..... ۳۵
- شکل (۲-۳) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل حاصل از مدل مصنوعی با عمق بالای ۱۰ کیلومتر و عمق پایین ۲۰ کیلومتر و شاخص فرکتالی $\alpha = 3$ ۳۵
- شکل (۳-۳) تخمین عمق بالا با استفاده از روش مرکز یابی (الف). تخمین عمق متوسط با استفاده از روش مرکز یابی (ب)..... ۳۶
- شکل (۴-۳) نتیجه‌ی استفاده از روش مدل سازی پیشرو. عمق بالا ۱۳/۸ کیلومتر و عمق کف ۵۸ کیلومتر محاسبه شده است..... ۳۸
- شکل (۵-۳) تخمین عمق بالا با استفاده از روش مرکز یابی (الف). تخمین عمق متوسط با استفاده از روش مرکز یابی (ب)..... ۳۹
- شکل (۶-۳) نتیجه‌ی استفاده از روش مدل سازی پیشرو. عمق بالا ۱۱/۶ کیلومتر و عمق کف ۴۸/۵ کیلومتر محاسبه شده..... ۴۰
- شکل (۷-۳) نتیجه‌ی استفاده از روش مدل سازی پیشرو. عمق بالا ۱۰/۸ کیلومتر و عمق کف ۳۴/۷ کیلومتر محاسبه شده..... ۴۱
- شکل (۸-۳) تخمین عمق بالا با استفاده از روش مرکز یابی (الف). تخمین عمق متوسط با استفاده از روش مرکز یابی (ب)..... ۴۱
- شکل (۹-۳) تخمین عمق بالا با استفاده از روش مرکز یابی (الف). تخمین عمق متوسط با استفاده از روش مرکز یابی (ب)..... ۴۲
- شکل (۱۰-۳) نتیجه‌ی استفاده از روش مدل سازی پیشرو. عمق بالا ۹/۷ کیلومتر و عمق کف ۲۰/۳ کیلومتر محاسبه شده..... ۴۳
- شکل (۱۱-۳) نتیجه‌ی استفاده از روش مدل سازی پیشرو. عمق بالا ۹ کیلومتر و عمق کف ۱۶ کیلومتر محاسبه شده..... ۴۴

شکل (۳-۱۲) تخمین عمق بالا با استفاده از روش مرکزیابی (الف). تخمین عمق متوسط با استفاده از روش مرکزیابی (ب). ۴۴

شکل (۳-۱۳) مقایسه‌ی نتایج بدست آمده با روش‌های مرکز یابی و مدل سازی پیشرو با شاخص‌های فرکتالی متفاوت. ۴۶

شکل (۴-۱) نقشه‌ی واحدهای ساختاری-رسوبی ایران (مستطیل سیاه منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد). ۵۱

شکل (۴-۲) نقشه‌ی ساده شده زمین شناسی ایران بر پایه سن (مربع سیاه منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد). ۵۲

شکل (۴-۳) نقشه‌ی توپوگرافی شمال غرب ایران تهیه شده از مدل رقومی ارتفاع ۹۰ متر سازمان زمین‌شناسی کشور. ۵۳

شکل (۴-۴) نقشه‌ی گسل‌های فعال ایران (مستطیل سیاه رنگ منطقه مورد مطالعه و دایره قرمز گسل تبریز را نشان می‌دهد). ۵۴

شکل (۴-۵) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل بعد از اعمال تصحیحات برگردان به قطب مغناطیسی و حذف اثر IGRF. ۵۸

شکل (۴-۶) نام پنجره‌ها، نحوه‌ی پنجره گذاری و محل قرار گیری پنجره‌ها. ۶۰

شکل (۴-۷) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل پنجره‌ی ۳-۲- b قبل از اعمال هر گونه پردازش. ۶۲

شکل (۴-۸) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل پنجره‌ی ۳-۲- b بعد از اعمال فیلتر میان گذر. ۶۴

شکل (۴-۹) نحوه‌ی اعمال فیلتر میان گذر ۴ تا ۸۰ کیلومتر. فیلتر مورد استفاده (الف). طیف توان اصلی (خط ممتد) و طیف توان بعد از اعمال فیلتر (خط چین) (ب). محدوده‌ی مربع مشخص شده با خط چین پاسخ دامنه‌ی فیلتر اعمال شده می باشد. شکل تغییر یافته از شکل (۳) هیسارلی و همکاران (۲۰۱۲) می‌باشد. ۶۴

شکل (۴-۱۰) نتایج تخمین عمق بالا (الف) و تخمین عمق متوسط (ب) پنجره‌ی ۳-۲- b ۶۶

شکل (۴-۱۱) نتایج استفاده از روش مدل سازی پیشرو برای پنجره‌ی ۳-۲- b . عمق بالا ۴ و عمق کف ۱۶/۵ کیلومتر تخمین زده شدند. ۶۸

شکل (۴-۱۲) نتایج بدست آمده از تخمین عمق با استفاده از طیف دی-فرکتال شده با روش مرکز یابی. تخمین عمق بالا (الف) تخمین عمق متوسط (ب). ۷۱

شکل (۴-۱۳) نتایج بدست آمده با استفاده از طیف دی-فرکتال شده با روش مدل سازی پیشرو. لوزی‌های قرمز طیف اصلی و دایره‌های آبی طیف دی-فرکتال شده با شاخص فرکتالی ۱/۶ را نشان می‌دهد. خط سیاه مدل برازش شده پیشرو می‌باشد. ۷۱

شکل (۴-۱۴) شکل بالا مقایسه نتایج بدست آمده از تخمین عمق بالا و شکل پایین نتایج بدست آمده از تخمین عمق کف بی‌هنجاریهای مغناطیسی. شاخص‌های فرکتالی بدست آمده برای هر پنجره در هر دو شکل آمده است. ۷۴

شکل (۵-۱) نقشه‌ی تغییرات خطوط کنتوری عمق نقطه‌ی کوری بر روی نقشه‌ی توپوگرافی شمال غرب ایران تهیه شده از مدل رقومی ارتفاع ۹۰ متر سازمان زمین‌شناسی کشور. قله‌ی سهند در مرکز نقشه و قله‌ی سبلان در قسمت شمال شرق نقشه مشاهده می‌شود. (فاصله‌ی خطوط کنتوری ۰/۲ کیلومتر می‌باشد) (نقاط سیاه رنگ محل چشمه‌های آب گرم را نشان می‌دهد). ۷۷

شکل (۵-۲) نقشه‌ی کنتوری تغییرات عمق نقطه‌ی کوری بر روی نقشه‌ی مغناطیسی برگردان به قطب شده در شمال غرب ایران با روش مدل سازی پیشرو با طیف دی-فرکتال شده (فاصله خطوط کنتوری ۰/۲ کیلومتر می‌باشد). ۷۸

شکل (۵-۳) نقشه‌ی تغییرات خطوط کنتوری گرادیان حرارتی بر روی نقشه‌ی توپوگرافی شمال غرب ایران تهیه شده از مدل رقومی ارتفاع ۹۰ متر سازمان زمین‌شناسی کشور. قله‌ی سهند در مرکز نقشه و قله‌ی سبلان در قسمت شمال شرق نقشه مشاهده می‌شود. (فاصله خطوط کنتوری $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ می‌باشد). ۷۹

شکل (۴-۵) نقشه‌ی تغییرات گرادیان حرارتی بر روی نقشه‌ی مغناطیسی برگردان به قطب شده در شمال غرب ایران (فاصله خطوط کنتوری 1°Ckm می باشد) (نقاط سیاه رنگ چشمه‌های آب گرم منطقه را نشان می دهد)..... ۸۰

شکل (۵-۵) نقشه‌ی تغییرات جریان حرارتی بر روی نقشه‌ی مغناطیسی برگردان به قطب شده در شمال غرب ایران (فاصله خطوط کنتوری $2\text{mW} / \text{m}^2$ می باشد)..... ۸۱

شکل (۶-۵) نقشه‌ی تغییرات خطوط تراز جریان حرارتی بر روی نقشه‌ی توپوگرافی شمال غرب ایران تهیه شده از مدل رقومی ارتفاع ۹۰ متر سازمان زمین شناسی کشور. قله‌ی سهند در مرکز نقشه و قله‌ی سبلان در قسمت شمال شرق نقشه مشاهده می شود (فاصله خطوط کنتوری $2\text{mW} / \text{m}^2$ می باشد)..... ۸۲

فهرست جداول

- جدول (۳-۱) نتایج حاصل از تخمین عمق به روش‌های مرکز یابی و مدل سازی پیشرو با شاخص‌های فرکتالی متفاوت... ۴۵
- جدول (۴-۱) نام پنجره‌ها و مختصات مرکز پنجره‌ها ۶۱
- جدول (۴-۲) نتایج حاصل از تخمین عمق بی‌هنجاری مغناطیسی به روش مرکز یابی ۶۷
- جدول (۴-۳) نتایج حاصل از تخمین عمق بی‌هنجاری مغناطیسی به روش مدل سازی پیشرو ۶۹
- جدول (۴-۴) نتایج حاصل از تخمین عمق با استفاده از طیف دی-فرکتال شده با روش‌های مرکز یابی و مدل سازی پیشرو ۷۲

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه

امروزه با توجه به افزایش بحران آلاینده‌های ناشی از انواع سوخت‌های فسیلی، سوخت‌های اتمی، و فاکتورهای جدید زیست محیطی که توسط نهادهای بین‌المللی ارائه شده است، بسیاری از کشورها از جمله کشور ایران جایگزینی انرژی‌های تجدیدناپذیر توسط انرژی‌های تجدیدپذیر را مبنای برنامه‌ریزی بلند مدت خود قرار داده‌اند. این امر موجب گردیده تا امروزه به این مباحث با جدیت بیشتری پرداخته شود.

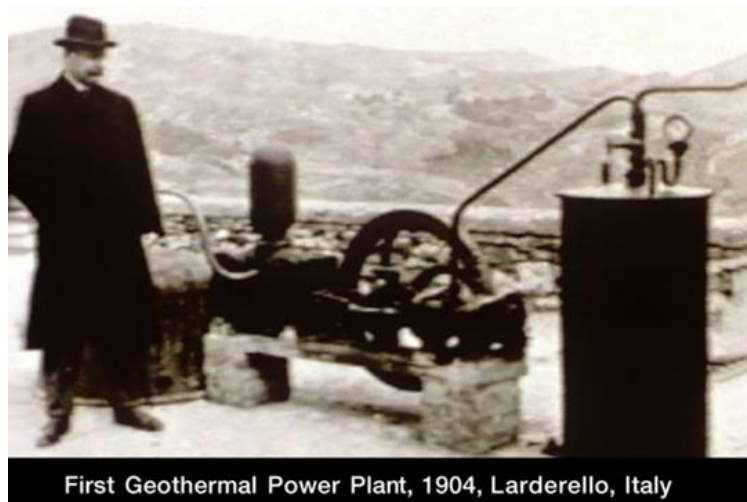
منابع انرژی زمین گرمایی^۱ یکی از انواع منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. انرژی زمین گرمایی، به انرژی موجود در عمق زمین اطلاق می‌شود که عمدتاً در نواحی زلزله‌خیز و آتشفشانی جوان متمرکز شده است. زمین منبع عظیمی از انرژی است که حرارت در هسته‌ی آن به بیش از ۵۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. درجه حرارت زمین با توجه به عمق آن به صورت غیر خطی زیاد می‌شود (با تقریب خطی هر ۱۰۰ متر ۳ درجه سانتی‌گراد). انرژی حرارتی ذخیره شده در ۱۱ کیلومتر فوقانی پوسته‌ی زمین به صورت تقریبی معادل پنجاه هزار برابر کل انرژی به دست آمده از منابع نفت و گاز شناخته شده‌ی امروز جهان است. انرژی زمین گرمایی بر خلاف سایر انرژی‌های تجدیدپذیر محدود به فصل، زمان و شرایط خاصی نبوده و بدون وقفه قابل بهره‌برداری می‌باشد. همچنین قیمت تمام شده‌ی برق در نیروگاه‌های زمین گرمایی با برق تولیدی از سایر نیروگاه‌های متعارف (فسیلی) قابل رقابت بوده و حتی از انواع دیگر انرژی‌های نو به مراتب ارزان‌تر است [۱].

۱-۲- تاریخچه‌ی انرژی زمین گرمایی در جهان و ایران

اولین نشانه‌ی وجود انرژی زمین گرمایی کوه‌های آتشفشانی است اما پی بردن به آن برای انسان صدها هزار سال به طول انجامید. در فاصله‌ی زمانی بین قرن‌های ۱۶ و ۱۷ اولین چاه‌ها برای این هدف حفر شدند.

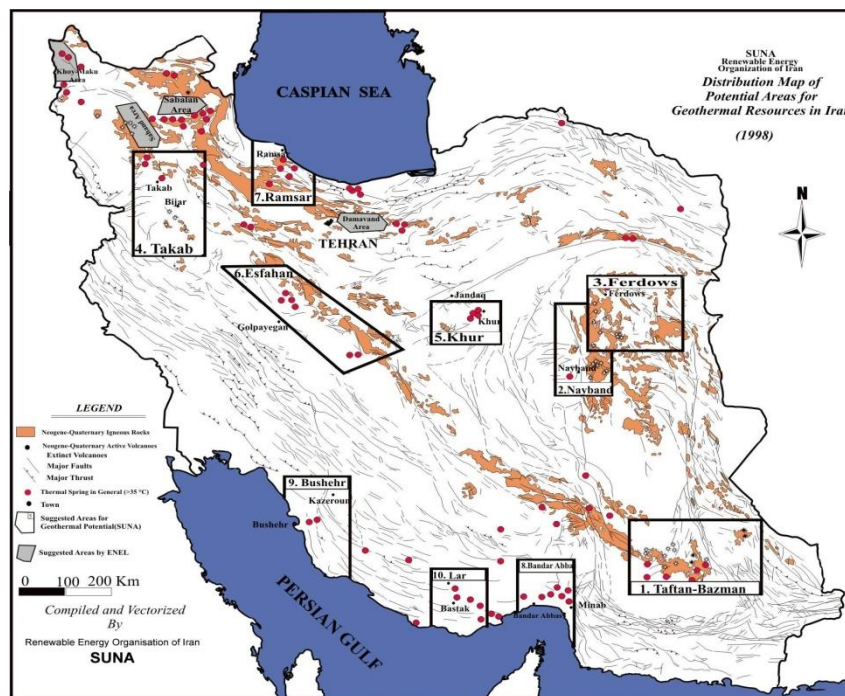
^۱ Geothermal energy

قرن ۱۸ را می‌توان شروع علمی این فعالیت دانست زمانی که در بلفورت فرانسه اولین اندازه‌گیری‌ها انجام شد. در سال ۱۸۷۰ استخراج بخار آب طبیعی به منظور بهره‌برداری از انرژی مکانیکی انجام شد. سرانجام



شکل (۱-۱) اولین دستگاه که با انرژی زمین گرمایی کار می‌کرد، لئوناردو، ایتالیا، ۱۹۰۴.

در سال ۱۹۰۴ از انرژی زمین گرمایی به منظور تولید برق استفاده شد. پس از جنگ جهانی دوم در سال ۱۹۵۸، نیوزلند به عنوان دومین کشور فعال در این زمینه اقدام به تولید برق از انرژی زمین گرمایی نمود. در ایران وزارت نیرو با همکاری مهندس‌های مشاور ایتالیایی در سال ۱۹۵۴ پروژه‌ای به منظور شناسایی پتانسیل‌های منابع زمین گرمایی را کلید زد. این پروژه در محدوده‌ای به وسعت ۲۶۰ هزار کیلومتر مربع آغاز شد. نتیجه‌ی این تحقیقات مناطق سبلان، دماوند، خوی، ماکو و سهند را با مساحتی بالغ بر ۳۱ هزار کیلومترمربع جهت بهره‌برداری مستعد یافت [۱]. در سال ۱۳۶۱ با پایان یافتن مطالعات اکتشاف مقدماتی در هر یک از مناطق ذکر شده، نواحی مستعد با دقت بیشتری شناسایی شد. شکل (۱-۲) نقشه‌ی پتانسیل سنجی انرژی زمین گرمایی ایران که در سال ۱۳۷۷ توسط سازمان انرژی‌های نو منتشر شد را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۲) نقشه‌ی پتانسیل سنجی انرژی زمین گرمایی ایران [۱]

۱-۳- اکتشاف منابع زمین گرمایی

سیستم‌های زمین گرمایی را می‌توان در ناحیه‌هایی یافت که گرادیان^۱ زمین گرمایی در آن‌ها مقداری از شرایط عادی بیشتر باشد. در لبه‌های صفحات تکتونیکی^۲ و در نواحی آتشفشانی غالباً گرادیان زمین گرمایی از شرایط عادی بیشتر است. مطابق شکل (۱-۳) ماگما^۳ هنگام حرکت به سمت سطح زمین بخش زیادی از خود را در قسمت‌های فوقانی گوشته^۴ و تحتانی پوسته^۵ از دست می‌دهد. گرمای ماگما به منطقه‌ی وسیعی از سنگ‌ها منتقل می‌شود و آب‌های موجود در منطقه را گرم‌تر می‌کند. بخشی از این آب‌ها ممکن است بصورت بخار یا آب داغ از طریق شکستگی‌های موجود در سنگ‌ها به سطح رسیده و بصورت

^۱ Gradient

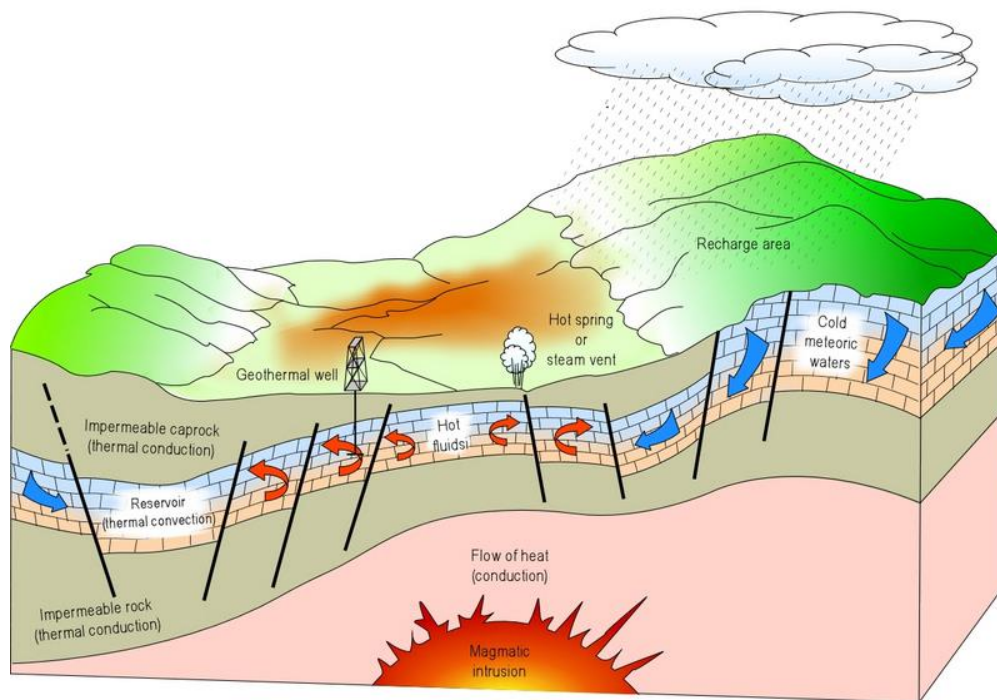
^۲ Plate

^۳ Magma

^۴ Mantle

^۵ Crust

چشمه‌های آب گرم، گل‌فشان^۱ و ... پدیدار شوند. بخشی از این آب‌ها ممکن است هنگام بالا آمدن در دام لایه‌های سنگی ناتراوا^۲ قرار گرفته و تشکیل یک ذخیره زمین گرمایی را بدهد [۲].



شکل (۳-۱) نمایش یک سیستم زمین گرمایی [۲].

روش‌های مختلف ژئوفیزیکی مانند مغناطیس‌سنجی^۳، الکترومغناطیس^۴، و گرانی‌سنجی^۵ در مراحل اکتشاف مقدماتی یا حتی نیمه‌تفضیلی منابع زمین گرمایی در کنار روش‌های هیدروژئوشیمیایی و زمین‌شناسی کاربرد بسیاری دارد [۳].

^۱ Mud gun

^۲ Non-Permeable

^۳ magnetic

^۴ Electromagnetic

^۵ Gravity

۱-۴- روش مغناطیس‌سنجی هوابرد^۱ و تعیین عمق نقطه‌ی کوری^۲

استفاده از روش‌های مغناطیس‌سنجی برای شناسایی مناطق مستعد زمین گرمایی بسیار متداول است [۴][۵]. شناسایی بسترهای سنگ آذرین و دگرگونی که در زیر لایه‌های رسوبی مدفون شده‌اند، آشکارسازی ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل‌ها، بالاآمدگی‌ها و تورفتگی‌ها که از کاربردهای روش‌های مغناطیس‌سنجی می‌باشد، برای تشخیص مناطق مستعد زمین گرمایی بسیار حائز اهمیت است. اما تعیین عمق نقطه‌ی کوری یکی از با اهمیت‌ترین کاربردهای این روش جهت شناسایی مناطق مستعد منابع زمین گرمایی است [۶].

وقتی درجه حرارت افزایش می‌یابد، نوسانات دو قطبی‌های مغناطیسی در ماده به گونه‌ای زیاد می‌شود که دیگر نمی‌توان جهت‌گیری خاصی برای آن‌ها در نظر گرفت. هنگامی که درجه حرارت از نقطه خاصی که به نام دمای کوری^۳ شناخته می‌شود بالاتر می‌رود، مواد خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند و ماده از حالت فرومغناطیس^۴ به حالت پارامغناطیس^۵ درمی‌آید. دمای کوری برای کانی مگنتیت^۶ تقریباً ۵۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد که در این دما کانی مگنتیت خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهد [۷]. همین‌طور مغناطیدگی^۷ سنگ‌های پوسته حاوی مگنتیت در دماهای بالاتر از دمای کوری از بین می‌رود. بنابراین عمقی که دمای آن به نقطه‌ی کوری می‌رسد را به عنوان عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی یا عمق نقطه‌ی کوری فرض می‌کنند. عمق نقطه‌ی کوری از منطقه‌ای به منطقه دیگر با توجه به زمین‌شناسی منطقه و کانی‌های موجود در سنگ‌ها تغییر می‌کند.

اگر دمای سطح زمین به طور متوسط ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شود با توجه به گرادیان زمین گرمایی (با تقریب خطی هر ۱۰۰۰ متر ۳ درجه‌ی سانتی‌گراد) و دمای کوری کانی‌های مغناطیسی (حدود

^۱ Aero magnetic

^۲ Curie point depth

^۳ Curie temperature

^۴ Fro-magnetic

^۵ Para-magnetic

^۶ Magnetite

^۷ Magnetization

۵۸۰ درجه سانتی گراد) می توان دمای کوری را در حدود عمق ۵ تا ۲۵ کیلومتری پوسته مشاهده کرد. این عمق در مناطق مختلف با توجه به زمین شناسی منطقه متفاوت است. در مناطق مستعد منابع زمین گرمایی به دلیل توزیع بالای حرارت این عمق به طور قابل توجهی کم می شود. با محاسبه و بررسی تغییرات خطوط هم دمای کوری یک منطقه می توان اطلاعات ارزشمندی درباره ی تغییرات ناحیه ای درجه حرارت در عمق و تجمع منابع زمین گرمایی به دست آورد.

تعیین عمق نقطه ی کوری از آن دسته از مسائلی است که سال ها ذهن محققین مختلف را درگیر خود کرده است. در پنج دهه ی اخیر تحقیقات متعددی در این زمینه صورت گرفته و روش های گوناگونی نیز ارائه شده است. این روش ها معمولاً بر اساس آنالیز طیفی^۱ داده های مغناطیس هوابرد در حوزه ی فوریه^۲ برای تشخیص عمق کف بی هنجاری های مغناطیسی استوار است [۸][۹][۱۰][۱۱][۱۲][۱۳].

دو روش متداول برای تخمین عمق کف توده های مغناطیسی بر اساس آنالیز طیفی داده های مغناطیس هوابرد مورد استفاده قرار گرفته است. اسپکتور^۳ و گرنت^۴ (۱۹۷۰) به بررسی خواص آماری الگوهای ناهنجاری های مغناطیسی پرداختند. آن ها نشان دادند که مقدار مورد انتظار طیف یک مدل حجمی مشابه میانگین عمق بالایی یک منشور مستطیلی مغناطیسی شده است [۸]. از طرف دیگر باتاچاریا^۵ و لئو^۶ (۱۹۷۵) به بررسی شکل آنومالی مغناطیسی منزوی پرداختند. آنها عمق مرکزی توده مغناطیسی را با استفاده از تفسیر بی هنجاری منفرد تخمین زدند [۹]. این روش زمانی که پیک طیف بر روی دامنه مشاهده نمی شود کاربرد دارد. اکیوبو^۷ و همکاران (۱۹۸۵) با ترکیب این دو روش عمق نقطه کوری را در جزیره کیوشو^۸ ژاپن تخمین زدند [۱۳]. روش های مختلف دیگری بعد از آن توسط محققین دیگر پیشنهاد شد که می توان به روش مرکزیابی^۹ [۱۴]، روش مرکزیابی اصلاح شده [۱۵]، روش پیک

^۱ Spectral analysis

^۲ Fourier domain

^۳ Spector

^۴ Grant

^۵ Bhattacharyya

^۶ Leo

^۷ Okoubo

^۸ Kyushu

^۹ Centroid method

طیفی^۱ [۱۶]، روش مدل‌سازی پیش‌رو^۲ [۱۷]، روش طیف مقیاس بندی شده^۳ [۱۸] روش طیف دی-فرکتال شده^۴ [۱۹] و روش طیف فرکتال شده [۲۰] اشاره کرد.

۱-۵- ضرورت انجام تحقیق

همان‌طور که بیان شد پتانسیل یک منطقه‌ی زمین گرمایی ارتباط مستقیم به گرادیان و جریان حرارتی در آن منطقه دارد. با تعیین عمق نقطه‌ی کوری می‌توان به گرادیان و جریان حرارتی در منطقه پی برد [۲۱]. ایده‌ی استفاده از داده‌های مغناطیس‌هوابرد به منظور تعیین عمق نقطه‌ی کوری جهت شناسایی مناطق مستعد منابع زمین گرمایی ایده‌ی جدیدی نبوده، از این رو روش‌های متفاوتی جهت تعیین عمق نقطه‌ی کوری ارائه شده است [۵][۸][۹].

عمق تعیین شده با این روش‌ها به دلیل فرضیات در نظر گرفته شده چندان دقیق نیست [۲۲] اما می‌توان به عنوان راهنمای اکتشافی از آن بهره برد. استفاده از داده‌های مغناطیس‌هوابرد جهت تعیین عمق نقطه‌ی کوری اولین بار در ایران توسط حجت و همکاران (۱۳۸۹) به کار گرفته شد. آن‌ها از مدل‌های ماهواره‌ای میدان مغناطیسی پوسته استفاده کردند، اما با توجه به بزرگی مقیاس در نظر گرفته شده برای آن تحقیق نتایج قابل قبولی را ارائه نکردند. آن‌ها یک منطقه در جنوب شرق کرمان و یک منطقه در ناحیه طبس معرفی کردند که در این نقاط عمق نقطه‌ی کوری را در حدود ۲۶ کیلومتر تخمین زدند [۲۳]. بعد از آن محققان دیگری در منطقه اردبیل با استفاده از روش‌های مرسوم‌تر اقدام به تخمین عمق نقطه‌ی کوری کردند و نتایج قابل قبول‌تری نیز ارائه دادند [۲۴][۲۲].

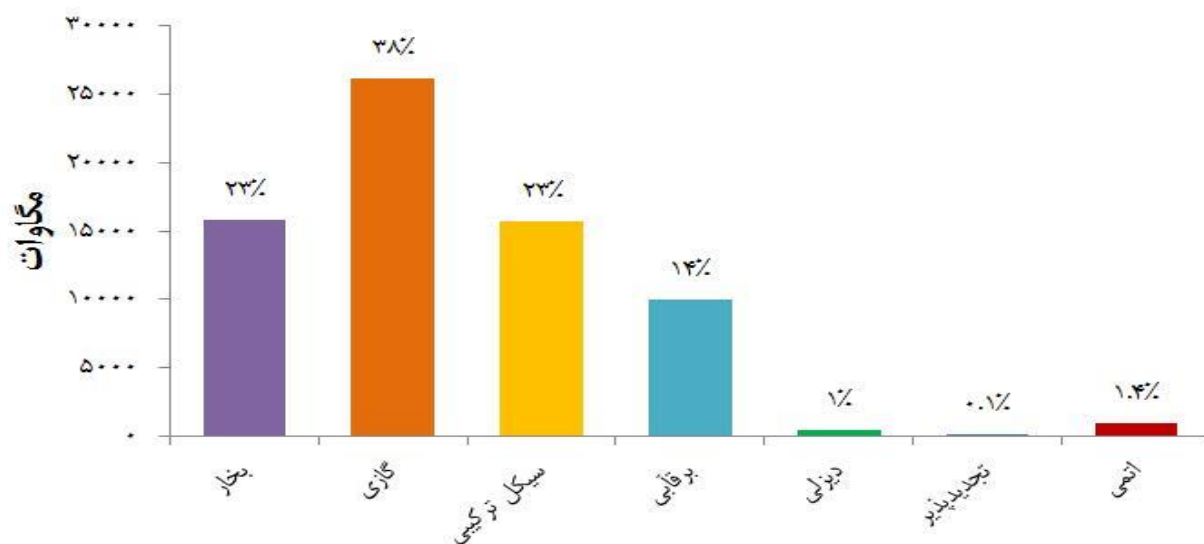
^۱ Spectral peak method

^۲ Forward modelling

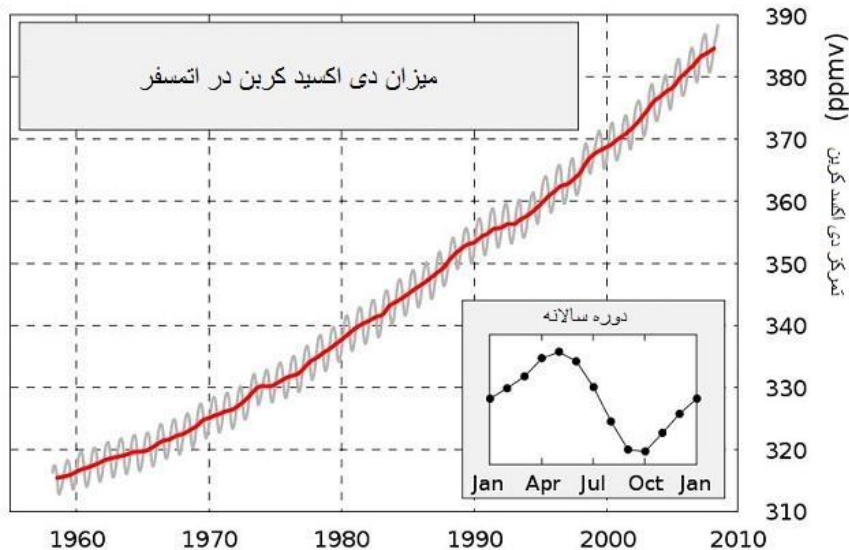
^۳ Scaling spectral method

^۴ De-fractal method

استفاده از سوخت‌های فسیلی سال‌هاست که به قسمتی از زندگی انسان‌ها بدل شده است. سوختی ارزان با قابلیت انتقال آسان که نیاز به فن‌آوری خاصی ندارد. امروزه می‌توان گفت انسان به استفاده از سوخت‌های فسیلی اعتیاد دارد و سال‌هاست که دنبال علاجی برای پایان دادن به این ماجراست. در شکل (۴-۱) کاملاً مشهود است که زندگی انسان تا چه اندازه به سوخت‌های فسیلی وابسته است. در شکل (۵-۱) میزان افزایش فزاینده‌ی تولید دی‌اکسیدکربن حاصل از انواع سوخت‌ها را که وارد جو زمین می‌شود



شکل (۴-۱) میزان تولید برق تولید شده در دنیا با تفکیک نوع سوخت مصرفی [۲۵].



شکل (۵-۱) میزان تولید دی‌اکسید کربن بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰ [۲۵].

مشاهده کنید. برای رهایی از این وابستگی باید به دنبال جایگزینی کم ضررتر برای سوخت‌های متعارف و زیان‌بار باشیم. انرژی زمین گرمایی به عنوان یک انرژی پاک می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی متعارف باشد. اما در کشور ایران، به دلیل دارا بودن منابع عظیم سوخت‌های فسیلی، این مسئله اهمیت چندانی ندارد، در صورتی که باید اهمیت بیشتری به انرژی‌ها نو و کم ضرر دهیم و به دنبال منابع انرژی پاک‌تر جدید باشیم. از این‌رو کشف منابع زمین گرمایی در کشور بسیار حائز اهمیت است.

۱-۶- هدف مطالعه و روش تحقیق

با حرکت به سمت عمق زمین درجه‌ی حرارت افزایش می‌یابد، در نقطه‌ای که دما به اندازه‌ی کافی زیاد شود سنگ‌ها از حالت فرومغناطیس به حالت پارامغناطیس تبدیل می‌شوند که این اتفاق برای کانی مگنتیت در دمای حدود ۵۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد.

تعیین عمق نقطه‌ی کوری به عنوان فاز اولیه در تعیین مناطق مستعد برای انجام پروژه‌های زمین گرمایی از اهمیت بالایی برخوردار است. از این‌رو در این تحقیق از روشی استفاده می‌شود که از سرعت بالا و دقت کافی برخوردار باشد. به منظور اکتشاف نقاط مستعد منابع زمین گرمایی از داده‌های مغناطیس هوابرد استفاده شده‌است. برای دستیابی به این هدف ابتدا اثر ^۱IGRF از داده‌های مغناطیس هوابرد منطقه حذف می‌شود. سپس فیلترهای کاهش به قطب ^۲ مغناطیسی و باند پس ^۳ در صورت نیاز اعمال خواهد شد [۲۱]. در مرحله‌ی بعد منطقه به پنجره‌هایی با اندازه‌ی مشخص شبکه‌بندی شده‌است. طیف توان به صورت جداگانه برای هر پنجره محاسبه شده‌است [۱۵]. سپس منحنی طیف توان ^۴ بر حسب عدد موج ^۵ برای هر پنجره رسم می‌شود، ابعاد پنجره‌ها را باید طوری انتخاب شود که طول پنجره‌ها حداقل پنج برابر عمق مورد مطالعه باشد تا از نقاط بیشتری روی نمودار طیف توان عدد موج استفاده شود. سپس نمودار طیف

^۱ International geomagnetic references field

^۲ Reduce to the pole

^۳ Band pass filter

^۴ Power spectra

^۵ Wave number

توان-عدد موج را رسم شده و بعد با استفاده از روش‌های مختلف عمق بالا و عمق متوسط پوسته‌ی مغناطیسی تخمین زده خواهد شد [۵]. با توجه به رابطه‌ی عمق بالا و متوسط با عمق کف می‌توان عمق کف را برای هر پنجره محاسبه شده و آن را به مرکز پنجره نسبت می‌دهیم [۲۱] سپس نقشه‌ی عمق دمای کوری را برای منطقه ترسیم خواهد شد. در مرحله‌ی بعد با توجه به گرادیان حرارتی و ضریب هدایت حرارتی سنگ‌های منطقه، نقشه‌ی جریان حرارتی منطقه نیز تهیه خواهد شد..

۱-۷- ساختار پایان نامه

مطالب این پایان‌نامه در شش فصل تدوین شده است.

در فصل اول کلیاتی از پایان‌نامه به همراه مزیت استفاده از انرژی زمین‌گرمایی، تعریف‌های مورد نیاز آورده شده است.

در فصل دوم به مرور روش‌های ارائه شده برای آنالیز طیفی داده‌های مغناطیس‌هاورد و بررسی مزیت‌ها و مشکلات آنها پرداخته شد.

در فصل سوم به بررسی یک مثال مصنوعی پرداخته شده است و از روش‌های مختلفی به منظور آنالیز طیفی مثال مصنوعی استفاده شد و محدودیت‌های هر روش بررسی شد.

در فصل چهارم به تخمین عمق کوری منطقه مورد مطالعه با استفاده از آنالیز طیفی داده‌های مغناطیس‌هاورد پرداخته شده و عمق‌های مورد نظر تخمین زده شد.

در فصل پنجم به تهیه‌ی نقشه‌های عمق کوری، گرادیان حرارتی، و جریان حرارتی پرداخته شد و نتایج بدست آمده اعتبار سنجی شد.

در فصل ششم نتایج حاصل از این مطالعه جمع‌بندی شده و پیشنهاداتی برای مطالعات آتی در این زمینه ارائه شده است.

فصل دوم:

مروری بر روش‌های تخمین عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی

۲-۱- مقدمه

درک ساختار حرارتی و تغییرات محلی عاملی مهم در درک مراحل اولیه‌ی تفکیک صفحات و شناسایی منابع زمین گرمایی برای هر کشور می‌باشد. برای این نیاز است مدل‌های حرارتی محدود شده از لیتوسفر^۱ ساخته شود، که این محدودیت‌ها شامل هدایت حرارتی، اطلاعات لرزه‌ای در اعماق مختلف، ضخامت پوسته و لیتوسفر و برآورد جریان حرارتی در منطقه می‌باشد [۲۶][۲۷].

تحلیل طیفی داده‌های مغناطیس‌هوابرد، ابزاری قوی برای بررسی ساختارهای حرارتی زمین به شمار می‌رود. برای توصیف تغییرات برخی کمیت‌ها مانند انرژی که خود تابعی از پارامترهای دیگر است از طیف آن کمیت استفاده شود [۲۲]. از نظر ریاضی یک سیگنال در حوزه‌ی زمان $f(t)$ را می‌توان به صورت $F(\omega)$ بیان کرد که در آن ω بسامد زاویه‌ای می‌باشد. $F(\omega)$ طیف توان تابع f در حوزه‌ی بسامد است. برای تحلیل‌های طیفی داده‌های مغناطیسی، عموماً لگاریتم طیف توان میانگین شعاعی در مقابل عدد موج k ترسیم می‌شود و عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با روش‌های متفاوتی محاسبه می‌شود.

با تجزیه و تحلیل طیفی داده‌های مغناطیس‌هوابرد می‌توان درجه حرارت پوسته را در محدوده‌ی حرارتی خاص شناسایی کرد و بر اساس آن نقشه‌ی هم‌دمای کوری را برای منطقه‌ی مورد مطالعه ترسیم کرد. در چهار دهه‌ی گذشته روش‌های مختلفی برای تخمین عمق کف منابع مغناطیسی Z_b ارائه شده‌است. همان‌طور که اشاره شد اساس این روش‌ها استفاده از میانگین شعاعی طیف فوریه^۲ است [۸][۹][۱۰][۱۱][۱۳][۱۸][۲۷]. فرمول ریاضی این روش‌ها با دو فرض اساسی که لایه‌ها صاف هستند و توزیع مغناطیسی خاصی دارند به دو گروه تقسیم می‌شوند: ۱- مدل‌های مغناطیسی

تصادفی^۳ (ناهمبسته^۴). ۲- مدل‌های مغناطیسی فرکتال (خود-مشابه^۵)

^۱ Lithosphere

^۲ azimuthally averaged Fourier spectra

^۳ Random magnetization

^۴ Uncorrelated

^۵ Self-similar

۲-۲- مدل‌های مغناطیسی تصادفی

۲-۲-۱- مقدمه

زمانی که یک سیگنال در حوزه‌ی زمان را به صورت تابعی از بسامد بیان شود، اصطلاحاً به آن طیف بسامد گفته می‌شود. بنابراین از نظر ریاضی یک سیگنال در حوزه زمان را می‌توان به صورت $F(\omega)$ بیان کرد. که در آن ω بسامد زاویه‌ای است. در مدل‌های مغناطیسی تصادفی برای محاسبه‌ی عمق بالا و عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی غالباً لگاریتم طیف توان میانگین شعاعی را در مقابل عدد موج (k) رسم می‌کنند و با روشهای متفاوتی عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را محاسبه می‌کنند.

۲-۲-۲- روش اسپکتور و گرنت [۸]

تحلیل طیف به وسیله‌ی مدل‌های آماری کاربرد بسیار گسترده‌ای در محاسبه عمق بالایی، عمق متوسط، و عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی دارد. باتاچاریا (۱۹۷۵) طیف توان یک بی‌هنجاری میدان مغناطیسی کل مربوط به یک بلوک مستطیلی را به صورت تابعی از عدد موج (k) ، در جهت X ، Y به دست آورد [۹]. اسپکتور و گرنت (۱۹۷۰) با فرض اینکه بی‌هنجاری‌های روی نقشه‌های مغناطیسی به منشورهای قائم وابسته‌اند این موضوع را تعمیم دادند. طیف توان آنومالی‌های مغناطیسی موجود در یک نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی با فرض این که مغناطیدگی سنگ‌ها تابع تصادفی از X و Y باشند، در مختصات قطبی به صورت زیر است [۳۰].

$$\langle E(r, \theta) \rangle = 4\pi^2 M^2 R_G^2 \langle e^{-rhr} \rangle \langle (1 - e^{-tr})^2 \rangle \langle S^2(r, \theta) \rangle \langle R_p^2(\theta) \rangle \quad (1-2)$$

$\langle \rangle$ بیان گر مقدار مورد انتظار،

$$r = (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}$$

اندازه‌ی عدد موج،

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{u}{v}\right)$$

جهت بردار عدد موج،

M ممان مغناطیسی به ازای واحد عمق،

h عمق بالایی منشور،

t ضخامت منشور،

S فاکتوری برای اندازه‌ی افقی منشور،

R_p فاکتوری برای مغناطیدگی منشور،

و R_G فاکتوری برای جهت میدان مغناطیسی زمین می‌باشد.

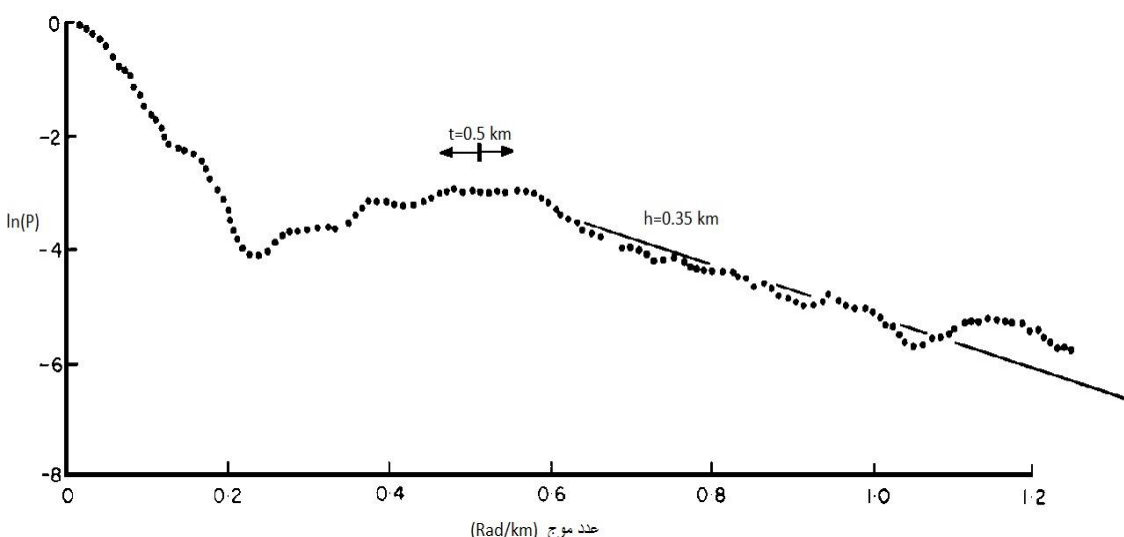
با میانگین‌گیری نسبت به $F(\omega)$ خواهیم داشت:

$$\langle E(r) \rangle = 4\pi^2 M^2 R_G^2 \langle e^{-2hr} \rangle \langle (1 - e^{-tr})^2 \rangle \langle S^2(r) \rangle \quad (2-2)$$

که در آن $\vec{E}$ ، $\vec{R}$ و $\vec{S}$ بیان‌گر میانگین این کمیت‌ها نسبت به θ می‌باشند.

اسپکتور و گرنت (۱۹۷۰) نشان دادند (شکل (۱-۲)) که شیب لگاریتم طیف فوریه‌ی میانگین بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، با عمق بالای آن‌ها مرتبط است. همچنین موقعیت پیک طیف‌ها بر روی محور بسامد با ضخامت لایه مغناطیسی مرتبط است [۸].

در این روش عمق متوسط منبع، با نرخ زوال طیف مغناطیسی در ارتباط است. این روش توزیع پارامترها را برای تعدادی از بلوک‌های مغناطیسی یکنواخت فرض می‌کند که منجر به زوال با نرخ نمایی وابسته به عمق می‌شود [۱۸]. همچنین در این روش نرخ زوال، قانون توانی وجود دارد که مستقل از عمق می‌باشد. اگر توزیع عمقی بلوک‌های مغناطیسی گوسی باشد، طیف توان مشاهده شده باید برای زوال قانون توانی مستقل از عمق تصحیح شود.



شکل (۲-۱) تحلیل طیفی انجام شده توسط اسپکتور و گرنت. h عمق بالای لایه و t ضخامت لایه [۸]

۲-۳-۲- روش پیک طیفی

اسمیت^۱ و همکاران [۳۱]، بولر^۲ و همکاران [۳۲] و کنراد^۳ و همکاران [۳۳] از اثر فاکتور $(1 - e^{-tr})$ معادله‌ی (۲-۲) برای یافتن ضخامت t عمیق‌ترین لایه‌ی مغناطیسی استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که پنجره‌ی داده‌ها باید به قدری بزرگ انتخاب شود که بتوان بی‌هنجاری‌های بسامد پایین مربوط به کف منابع مغناطیسی را شناسایی کرد [۳۳]. زمانی که فاکتور $(1 - e^{-tr})$ با فاکتور e^{-2hr} ترکیب شود پیکی در طیف تعریف می‌شود که با عمق کف منبع مغناطیسی در ارتباط است. زمانی که پیک قابل توجه باشد بیانگر این است که کف منبع قابل شناسایی می‌باشد [۳۰].

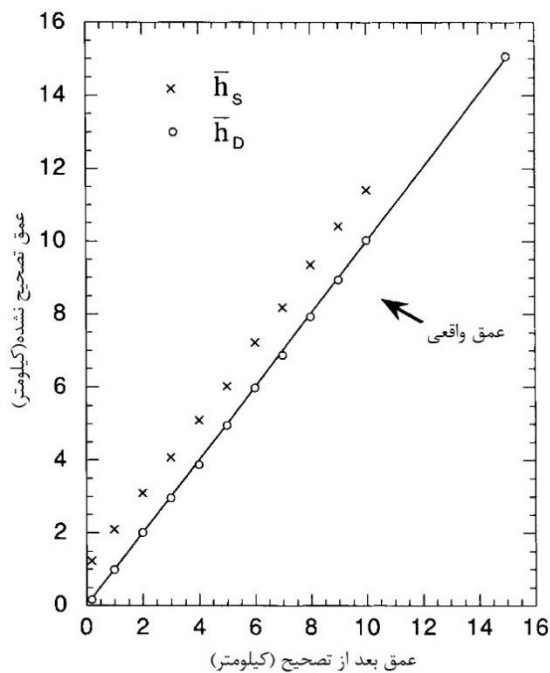
k_{peak} موقعیت پیک طیف را بر روی محور عدد موج (k) بیان می‌کند که خود تابعی از عمق بالا (Z_t) و عمق کف (Z_b) بی‌هنجاری مغناطیسی است که به صورت زیر بیان می‌شود. عمق کف را می‌توان با سعی و خطا محاسبه کرد [۱۸][۱۶].

^۱ smith
^۲ Boler

^۳ Conrad

$$k_{\text{peak}} = \frac{\ln Z_b - \ln Z_t}{Z_b - Z_t} \quad (3-2)$$

مبنای این روش مشاهده‌ی پیک در طیف است، اما پیک همیشه در طیف ظاهر نمی‌شود. ممکن است به دلیل انتخاب اشتباه ابعاد بهینه‌ی پنجره‌ها مشکلاتی در مشاهده‌ی پیک به وجود آید.



شکل (۲-۲) بهبود تخمین عمق روش اسپکتور و گرنت [۸] با استفاده از تصحیح قانون توان. دواير کوچک روی خط بیانگر عمق بهبود یافته می‌باشد. تخمین‌های روش اسپکتور و گرنت [۸] با علامت × مشخص شده‌اند. [۱۸]

۲-۲-۴- روش مدل سازی پیشرو

روات^۱ و همکاران [۱۷]، فین^۲ و روات [۳۴] و رز^۳ و همکاران [۳۵] به طور همزمان روش مدل سازی پیشرو را به منظور بهبود تخمین عمق کف ارائه دادند. آن‌ها با ارائه‌ی معادله (۴-۲) روشی جدید برای تخمین عمق پیشنهاد کردند.

^۱ Ravat

^۲ fin

^۳ Ross

$$P(k) = C \left(e^{-|k|z_t} - e^{-|k|z_b} \right)^2 \quad (۴-۲)$$

P طیف توان،

$$\vec{k} = (k_x, k_y, k_z) \quad \text{عدد موج،}$$

$$\vec{k} = |\vec{k}| = 2\pi/\lambda \quad \text{نرم عدد موج،}$$

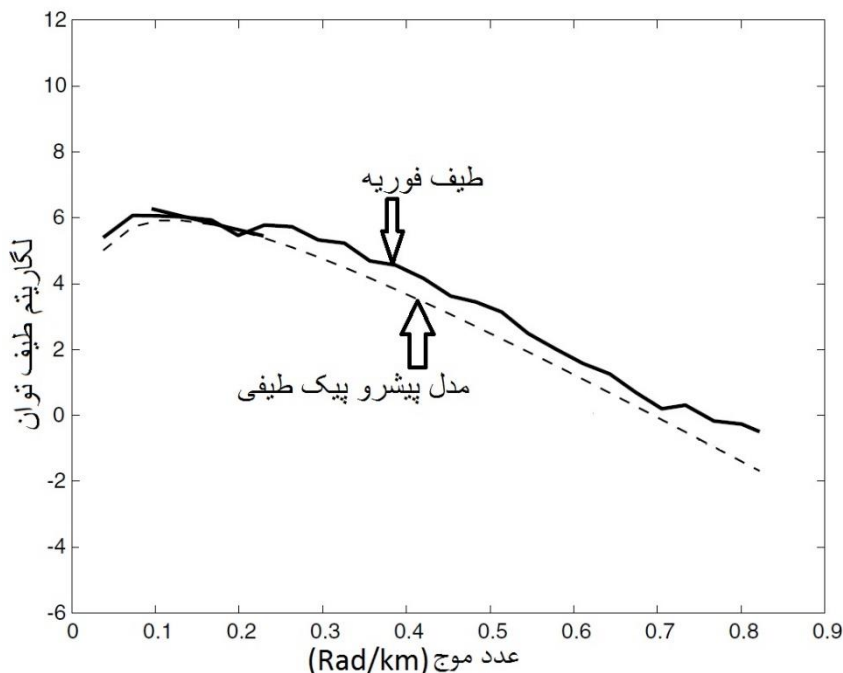
λ طول موج،

و ثابت C شامل پارامترهای مستقل از عمق می باشد.

برای درک بهتر عملکرد این روش مثالی از این روش را در شکل (۳-۲) مشاهده می کنید. در این شکل

منحنی سیاه رنگ طیف فوریه و خط چین سیاه رنگ مدل سازی پیشرو را نشان می دهد. این مدل سازی با

استفاده از معادله ی (۴-۲) انجام شده است.



شکل (۳-۲) مثالی از مدل سازی پیشرو. طیف فوریه (خط پیوسته) و طیف حاصل از مدل سازی پیشرو (خط چین). خط راست در بازه ۰/۳-۰/۱ عدد موج، محاسبه عمق را بر اساس روش اسپکتور و گرنت نشان می دهد. [۱۱].

همان‌طور که در شکل (۲-۲) مشاهده می‌کنید در این مدل سازی Z_b مفروض موقعیت پیک را در مجاورت عدد موج $0/1$ کنترل می‌کند و Z_t مفروض شیب مدل را در عدد موج‌های بالاتر از $0/5$ کنترل می‌کند. شیب بلافاصله بعد از پیک توسط ترکیبی از Z_b و Z_t کنترل می‌شود.

۲-۲-۵- روش مرکز یابی

بلکلی^۱ [۱۶] در سال ۱۹۹۵ معادله‌ی طیف توان (P) برای مجموعه‌ای از توده‌های دو بعدی را با فرض اینکه منابع دارای توزیع ناهمبسته‌ی یکنواخت تصادفی هستند به صورت زیر نوشت [۱۶]:

$$P(k_x, k_y) = 4\pi^2 C_m^2 \phi_m(k_x, k_y) |\Theta_m|^2 |\Theta_f|^2 e^{-|k|Z_t} \times (1 - e^{-|k|(Z_b - Z_t)})^2 \quad (5-2)$$

که در آن k_x و k_y عدد موج در جهات X و Y ،

C_m ثابت تناسب،

$\phi_m(k_x, k_y)$ طیف توان دو بعدی مغناطیدگی

و Θ_m و Θ_f به ترتیب فاکتورهای جهتی مرتبط با مغناطیدگی و میدان مغناطیسی زمین می‌باشند.

از آنجایی که در معادله‌ی فوق به جز $|\Theta_f|^2$ و $|\Theta_m|^2$ ، تمامی جملات دارای تقارن هستند به همین جهت،

$\phi_m(k_x, k_y)$ یک ثابت است. با فرض مغناطیدگی کاملاً تصادفی و ناهمبسته با میانگین‌گیری شعاعی

معادله‌ی (۵-۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت [۳۶]:

$$P(k) = A e^{-\gamma|k|Z_t} (1 - e^{-|k|(Z_b - Z_t)})^2 \quad (6-2)$$

در این معادله A_1 ثابت می‌باشد. برای محاسبه‌ی عمق مرکزی Z_o منبع مغناطیسی با استفاده از بخش

عدد موج پایین طیف توان معادله‌ی (۶-۲) را می‌توان به صورت ساده‌ی زیر نوشت [۱۳]:

$$\ln \left(\frac{P(k)^{1/\gamma}}{k} \right) = A_r - |k|Z_o \quad (7-2)$$

^۱ Blakly

در این معادله A_2 ثابت است. برای محاسبه‌ی عمق بالای منبع مغناطیسی Z_t معادله‌ی (۶-۲) را می‌توان ساده کرد. با فرض اینکه غالب سیگنال‌های طیف، سیگنال‌های بالای منبع هستند [۸][۱۳]:

$$\ln(P(k)^{1/r}) = A_r - 2|k|Z_t \quad (۸-۲)$$

تخمین عمق کف منبع مغناطیسی در این روش طی دو مرحله انجام می‌شود:

الف) محاسبه عمق مرکزی با استفاده از معادله‌ی (۷-۲)

ب) محاسبه عمق بالایی منبع با استفاده از معادله‌ی (۸-۲)

سپس عمق کف را می‌توان از معادله‌ی زیر محاسبه کرد:

$$Z_b = 2Z_0 - Z_t \quad (۹-۲)$$

۳-۲- روش طیف مقیاس بندی شده یا فراکتالی

اخیراً مطالعات انجام گرفته در زمینه‌ی تئوری میدان‌های ژئوپتانسیل نشان داد که چشمه‌های مغناطیسی پوسته و میدان ناشی از آن رفتار کاملاً تصادفی ندارند، بلکه یک نوع رفتار فراکتالی از خود نشان می‌دهند [۳۷]. اگر لگاریتم مربع طیف فوری‌هی یک سری زمانی (طیف توان) برحسب لگاریتم عدد موج یا فرکانس رسم شود، شیب منحنی بدست آمده به عنوان فاکتور مقیاس (بعد فراکتال) شناخته می‌شود [۱۰]. اسپکتور و گرنت روش تحلیل طیفی را بر اساس توزیع تصادفی چشمه برای تخمین ضخامت حوزه‌های رسوبی با استفاده از داده‌های مغناطیسی و گرانی ارائه دادند [۸]. بعدها مفهوم توزیع فراکتالی چشمه‌های بی‌هنجاری برای تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی ارائه شد که به نام روش تحلیل طیفی مقیاسی شناخته شد [۸]. مطالعاتی نیز تحت عنوان پروژه‌ی حفاری ژرف پوسته‌ی قاره‌ای در آلمان انجام شده است. نتیجه‌ی این پروژه تایید کرد که توزیع چگالی و پذیرفتاری مغناطیسی در پوسته‌ی زمین رفتار فراکتالی از خود نشان می‌دهند. بر اساس این مطالعات، مغناطش می‌تواند به صورت یک شکل با هندسه‌ی فراکتالی موسوم به نوفه‌ی مقیاس توصیف شود [۳۷]. چنین فرآیندهای کاتوره‌ای دارای چگالی توان

متناسب با عدد موج به توان مقداری ثابت است. یعنی طیف چگالی توان بی‌هنجاری با $k^{-\alpha}$ متناسب است که در آن k عدد موج و α بعد فراکتال یا فاکتور مقیاس توزیع فراکتالی چشمه است که قبلاً به آن اشاره کردیم.

۲-۳-۱- روش مرکز یابی اصلاح شده

معادلات (۱-۲) و (۲-۲) توزیع منابع مغناطیسی را، تصادفی و ناهمبسته فرض می‌کنند در صورتی که منابع مغناطیسی در سه جهت X ، Y و Z از یک رفتار فرکتالی یا مقیاس بندی شده تبعیت می‌کنند. بانسال^۱ و همکاران (۲۰۱۱) روشی مشابه روش مرکز یابی اما با دیدگاه فرکتالی پیشنهاد دادند [۱۵].

آنها طیف توان را با توزیع فرکتالی جهت محاسبه‌ی عمق مرکزی به صورت زیر بازنویسی کردند:

$$\ln \left(k^{\beta} \times \frac{P(k)}{k^{\gamma}} \right) = A_{\gamma} - \gamma k Z_0 \quad (۱۰-۲)$$

و برای محاسبه‌ی عمق بالایی معادله زیر را پیشنهاد دادند:

$$\ln \left(k^{\beta} \times P(k) \right) = A_{\gamma} - \gamma k Z_t \quad (۱۱-۲)$$

به دلیل رابطه‌ی متقابل نمای مقیاس بندی شده با عمق منابع مغناطیسی، بانسال و همکاران (۲۰۱۱) [۱۵] $\beta = 1$ در نظر گرفتند. برای این روش نمای مقیاس بندی شده باید کمتر از ۲ باشد در غیر این صورت $\frac{P(k)}{k^2}$ تصحیح خواهد شد.

^۱ Bansal

۲-۴- روش تخمین عمق با طیف دی- فرکتال شده

روش طیف دی-فرکتال شده طیف توان مشاهده‌ای را به صورت طیف توان مغناطیدگی فرکتالی در نظر می‌گیرد، در صورتی که مغناطیدگی در جهات X و Y فرکتالی و در جهت Z ثابت باشد. در این موارد طیف توان مشاهده شده معادل حاصل ضرب طیف توان مغناطیدگی تصادفی در $k^{-\alpha}$ می‌باشد [۱۹]:

$$\Phi_F(k_x, k_y) = \Phi_R(k_x, k_y) k^{-\alpha} \quad (2-12)$$

که در آن $\Phi_F(k_x, k_y)$ طیف توان مشاهده شده،

$\Phi_R(k_x, k_y)$ طیف توان ناشی از مدل با مغناطیدگی تصادفی،

و α شاخص فرکتالی ($\alpha = \beta - 1$) و β پارامتر فرکتالی مغناطیدگی می‌باشد [۳۹]. با تعیین مقدار α

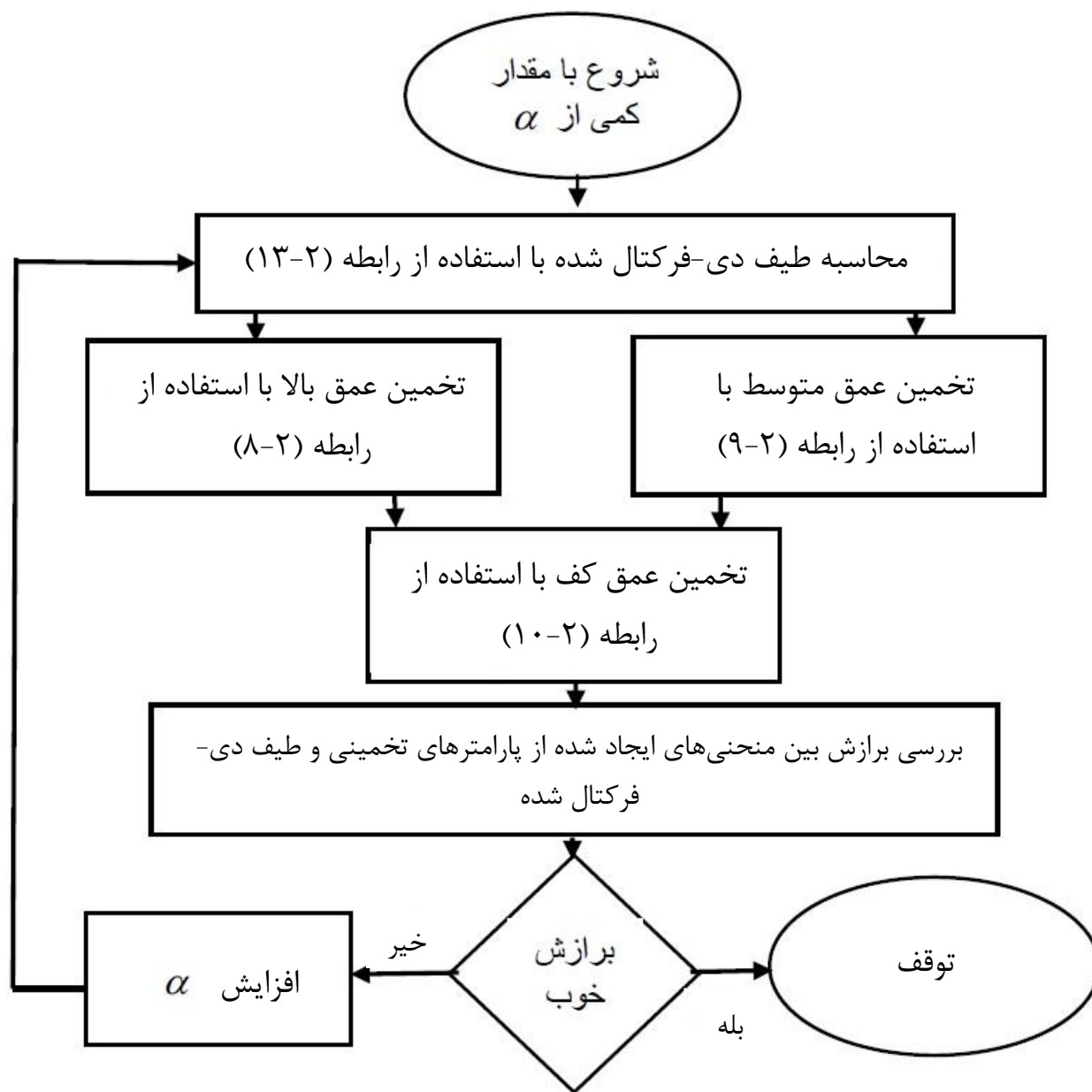
می‌توان طیف مشاهده‌ای را با ضرب کردن در فاکتور k^α دی-فرکتال کرد. در نتیجه طیف توان معادل با مغناطیدگی تصادفی حاصل می‌گردد:

k عدد موج شعاعی،

$$\Phi_R(k_x, k_y) = \Phi_F(k_x, k_y) k^\alpha \quad (2-13)$$

با حذف کردن اثر فرکتالی از طیف می‌توان با طیف حاصل مانند طیف توان با مغناطیدگی تصادفی برخورد نمود و از روابط آنها بهره برد [۱۹].

در شکل (۲-۴) نمودار گردشی این روش برای تخمین عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی ارائه شده است. برای شروع α مقدار کمی در نظر گرفته شده است و سپس مراحل، طبق فلوچارت اجرا می‌شود. معیار برازش خوب به صورت کاملاً چشمی ارزیابی می‌شود اما بیشتر برازش‌ها روی بلندترین طول موج‌ها صورت می‌گیرد [۱۹].



شکل (۲-۴) نمودارگردشی روش دی-فرکتال شده جهت تخمین عمق کف پوسته‌ی مغناطیسی [۱۹].

۲-۵- استفاده از موجک پیوسته و روش‌های وارون سازی

خجملی و همکاران (۱۳۹۴) روش جدیدی برای تخمین عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی ارائه کردند. همان‌طور که اشاره شد تمام روش‌های آنالیز طیفی داده‌های مغناطیس‌هوا برد جهت تخمین عمق کف بی‌هنجاری مغناطیسی طیفی سه مجهول دارند: عمق بالا، عمق کف و پارامتر فرکتالی. آن‌ها برای محاسبه‌ی عمق بالای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی از روش موجک پیوسته استفاده کردند و عمق بالای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را بین ۴ تا ۶ کیلومتر تخمین زدند. با این کار اولاً مجهولات مساله را کم کردند، سپس برای تخمین عمق کف و پارامتر فرکتالی به طور همزمان از روش وارون‌سازی لونبرگ - مارکوارت استفاده کردند. به دلیل رابطه‌ی ذاتی که این دو پارامتر با هم دارند جواب‌های غیر قابل قبول و دور از واقعیت بدست آوردند. آن‌ها پارامتر فرکتالی را که از روش حداقل مربعات بدست آوردند به عنوان پارامتر فرکتالی منطقه در نظر گرفتند. همچنین ضخامت بدست آمده با استفاده از روش لونبرگ - مارکوارت با مشتق‌گیری تحلیلی را قابل اعتمادتر از روش‌های دیگر در نظر گرفتند [۲۲]. آن‌ها پارامتر فرکتالی را بین ۵ تا ۶ تخمین زدند. آن‌ها ضخامت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را بین ۶ تا ۱۸ کیلومتر تخمین زدند. با اینکه روش استفاده شده توسط آن‌ها جدید است اما به نظر نمی‌رسد نتایج قابل قبولی را گرفته باشند.

۲-۶- مروری بر محاسبه‌ی عمق نقطه‌ی کوری و تهیه‌ی نقشه‌ی جریان حرارتی در

مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی

عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را می‌توان به عمق کوری آن‌ها نسبت داد. لذا با بررسی تغییرات عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی می‌توان به تغییرات هم‌دمای کوری در یک منطقه پی برد. این بررسی‌ها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی از توزیع دما در عمق و تمرکز انرژی زمین‌گرمایی در اختیار ما قرار دهد. همچنین با آنالیز طیفی داده‌های مغناطیس‌هوا برد و اطلاعات جریان حرارتی، می‌توان رابطه‌ای را

پیدا نمود و از آن برای تهیه‌ی نقشه‌های جریان حرارتی منطقه استفاده کرد. در ادامه به یک مطالعه‌ی موردی که جهت تعیین عمق نقطه‌ی کوری که با استفاده از روش‌های آنالیز طیف توان میانگین شعاعی انجام شده است پرداخته خواهد شد.

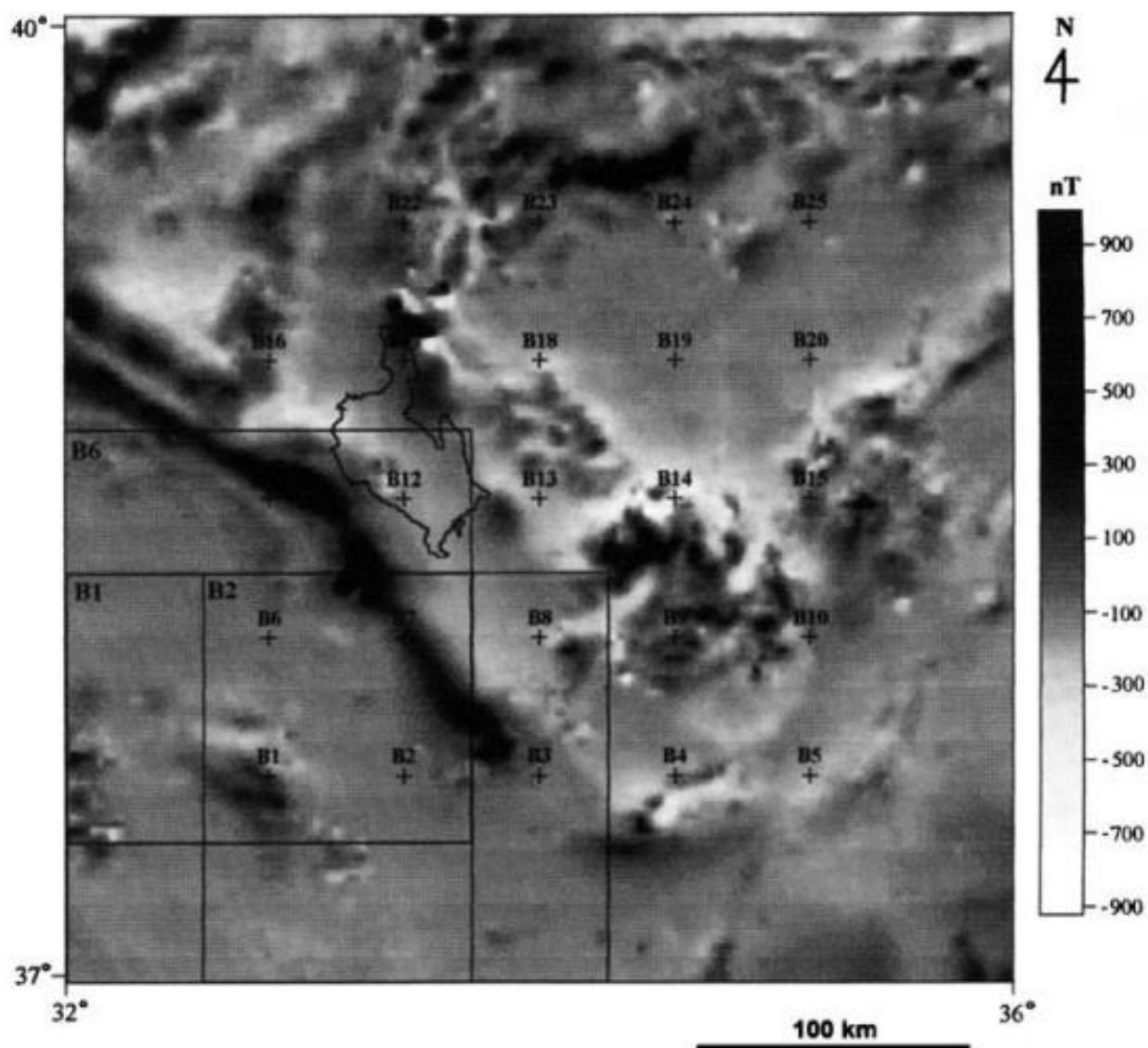
۲-۶-۱- تخمین عمق نقطه‌ی کوری و تهیه‌ی نقشه‌های گرادیان و جریان حرارتی در منطقه‌ی آناتولیا^۱، ترکیه

آتس^۲ و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از داده‌های مغناطیس‌هوابرد نقشه‌ی عمق کوری، گرادیان حرارتی و جریان حرارتی را در منطقه آناتولیا، ترکیه تهیه کردند. آن‌ها از داده‌های مغناطیس‌هوابرد با فاصله‌ی خطوط پروازی ۲ کیلومتر، فاصله‌ی نمونه برداری ۷۰ متر و ارتفاع پرواز ۶۰۰ متر بهره بردند. پس از حذف اثر IGRF از داده‌ها، نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی باقی‌مانده را با فاصله خطوط تراز ۵۰ نانو تسلا ترسیم کردند. سپس منطقه‌ی مورد مطالعه را به ۲۵ پنجره با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ کیلومتر مربع با همپوشانی ۵۰ کیلومتر تقسیم کردند. شکل (۲-۸) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی باقی‌مانده، محل قرار گیری مرکز پنجره‌ها و نحوه‌ی پنجره‌گذاری را در منطقه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد [۴۱].

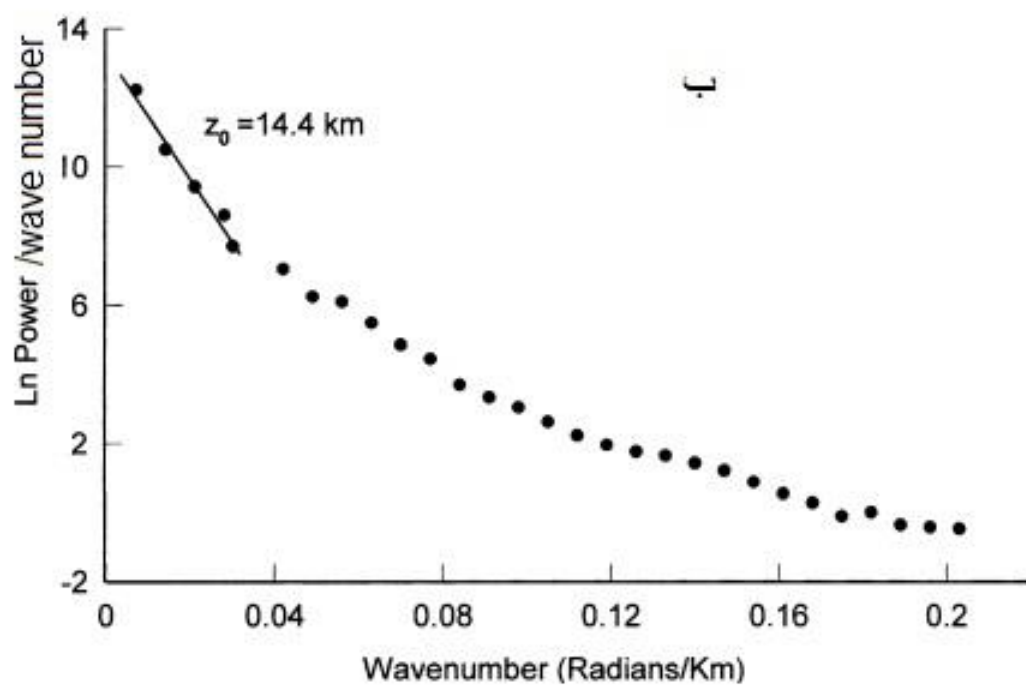
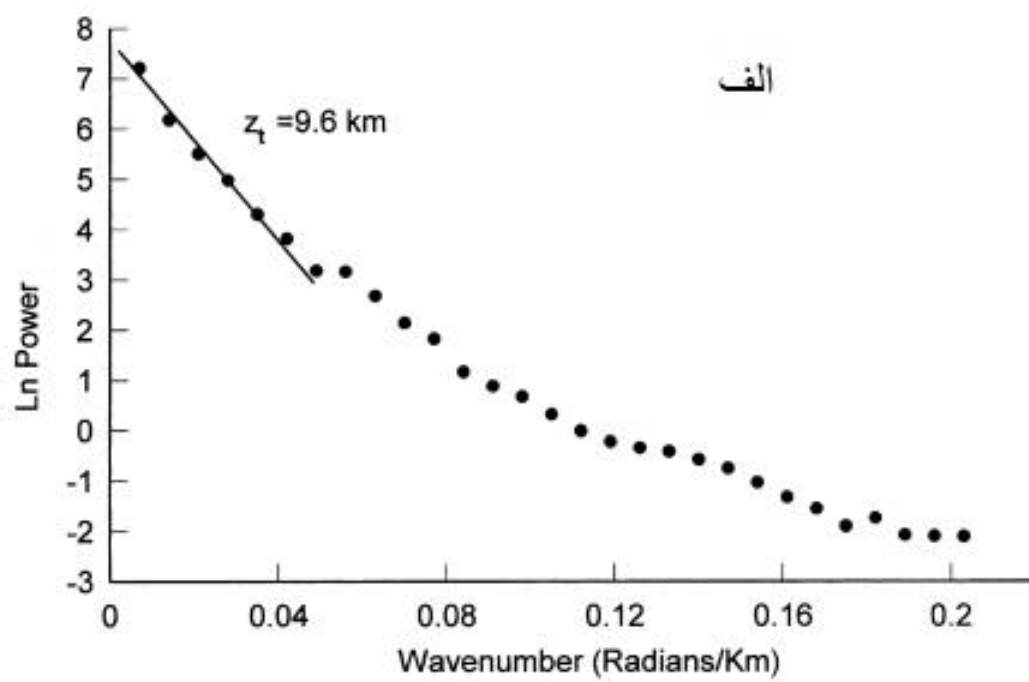
آن‌ها با استفاده از روش مرکز یابی و فرمول‌های (۲-۸) و (۲-۹) عمق بالا و متوسط پنجره‌ها را تخمین زدند. شکل (۲-۹) نتایج حاصل از تخمین بالا و متوسط مربوط به پنجره‌ی ۱۶ را نشان می‌دهد. آن‌ها عمق کف هر پنجره را با استفاده از فرمول (۲-۹) محاسبه کردند. شکل (۲-۱۰) نقشه‌ی عمق کف بی‌هنجاری مغناطیسی یا عمق کوری منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

^۱ Anatolia

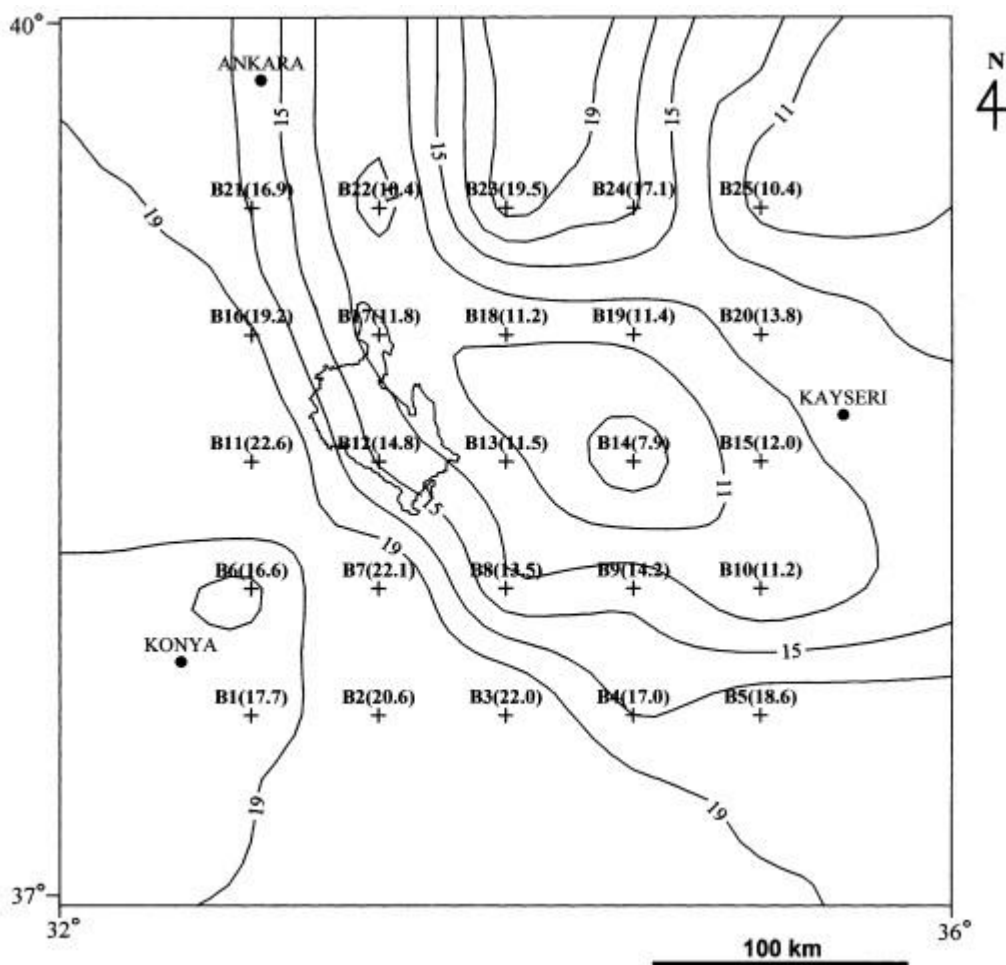
^۲ ates



شکل (۲-۸) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی باقیمانده آناتولیا. فاصله‌ی کنورها ۵۰ نانو تسلا. علامت + مرکز پنجره‌ها را نمایش می‌دهد [۴۱].



شکل (۲-۹) تخمین عمق بالا (الف). تخمین عمق متوسط (ب). پنجره‌ی شماره‌ی ۱۶ [۴۱].



شکل (۲-۱۰) نقشه‌ی عمق هم‌دمای کوری آناتولیا، ترکیه (فاصله خطوط تراز ۱/۵ کیلومتر) [۴۱].

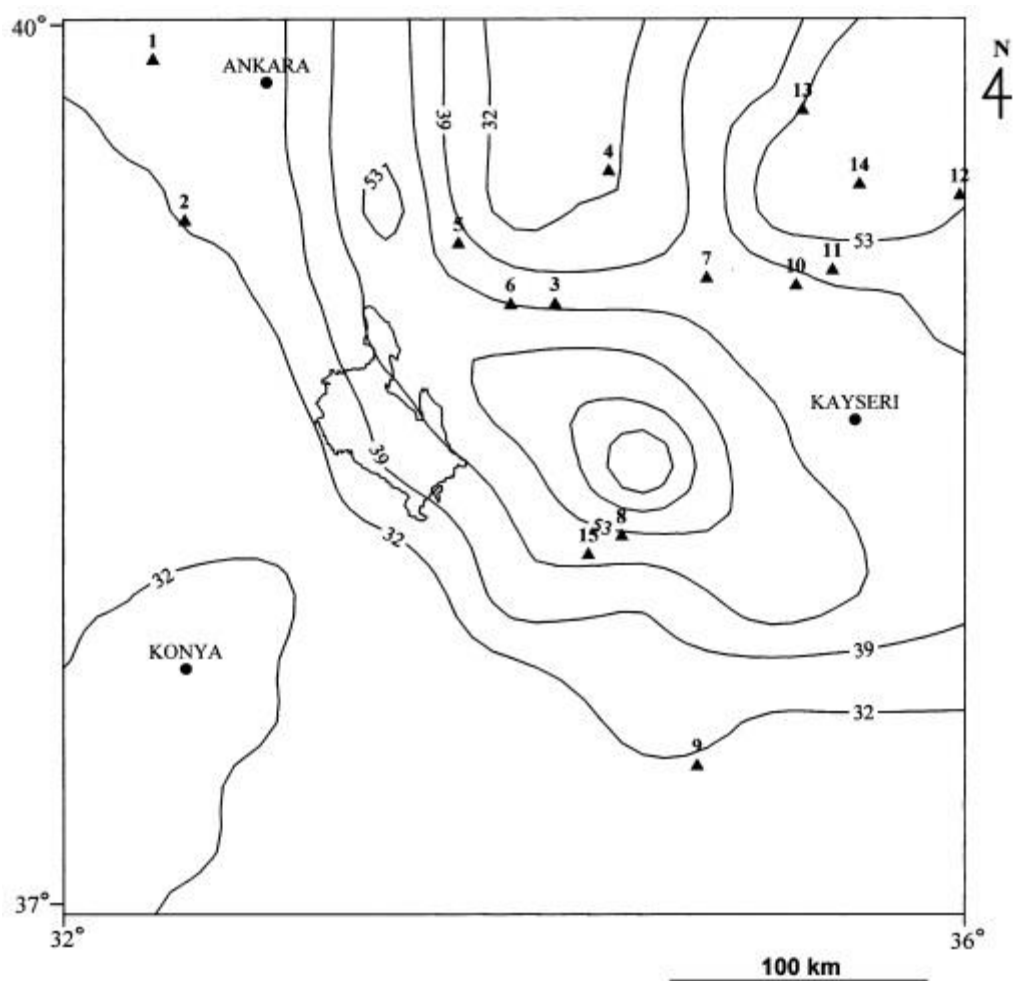
یکی از روش‌های تخمین گرادیان حرارتی پوسته، تعیین عمق نقطه‌ی کوری می‌باشد [۱۳]. به دلیل اینکه دمای کوری با توجه به کانی شناسی و فشار تغییر می‌کند، بازه‌ی تغییرات آن بین ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. در پوسته‌ی قاره‌ای دمای نقطه‌ی کوری را ۵۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در نظر می‌گیرند [۱۲]. نقشه‌ی گرادیان حرارتی به دست آمده در منطقه مورد مطالعه در شکل (۲-۱۱) به نمایش در آمده است.

آتس و همکاران (۲۰۰۵) از داده‌های عمق کوری برای محاسبه‌ی مقادیر جریان حرارتی استفاده کردند.

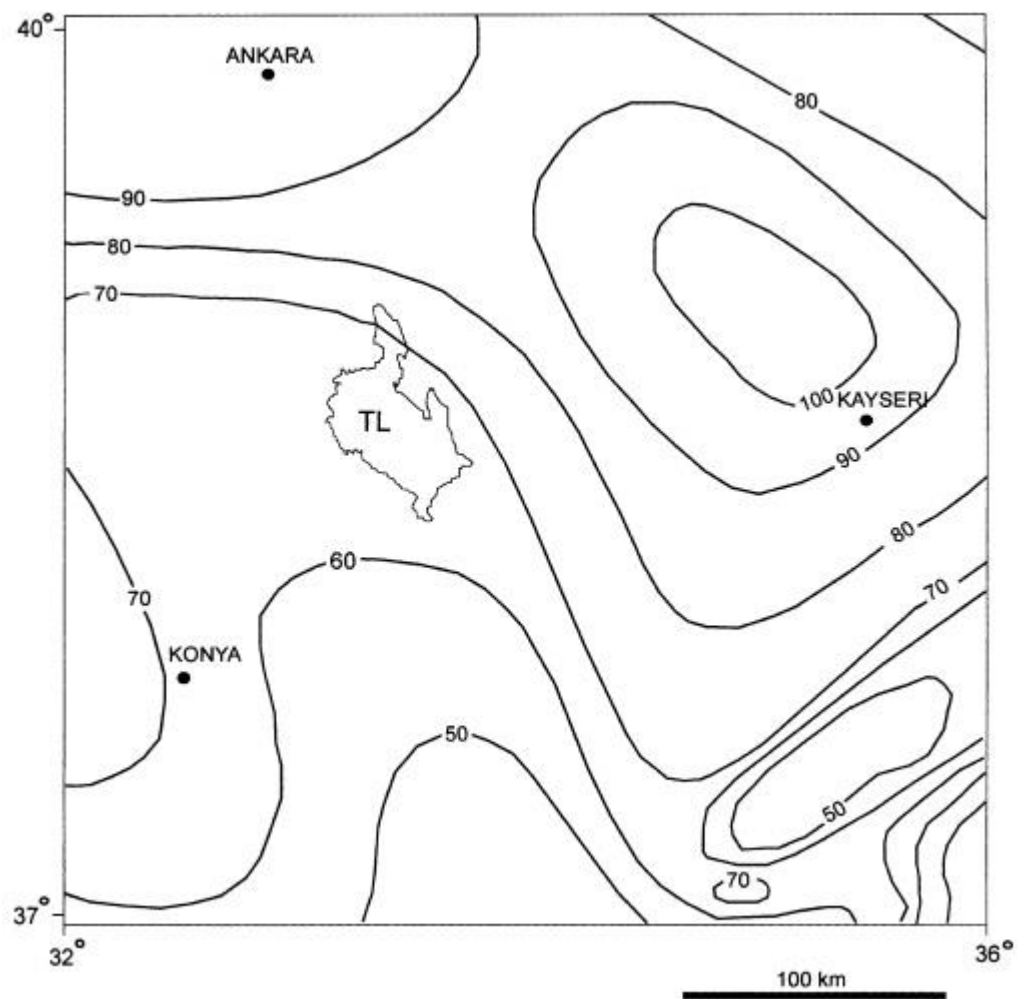
جریان حرارتی (q) با در اختیار داشتن گرادیان حرارتی $\left(\frac{\partial T}{\partial Z}\right)$ و ضریب هدایت حرارتی (k) به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$q = k \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \right) \quad (۱۴-۲)$$

آن‌ها ضریب هدایت الکتریکی را $۲/۱ \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ در نظر گرفته و سپس نقشه‌ی جریان حرارتی منطقه را ترسیم کردند. شکل (۱۲-۲) نقشه‌ی جریان حرارتی منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۲-۲) نقشه‌ی گرادیان حرارتی آناتولیا، ترکیه (فاصله خطوط تراز ۷°C/km می‌باشد) [۴۱].



شکل (۲-۱۲) نقشه‌ی جریان حرارتی آناتولیا، ترکیه (فاصله خطوط تراز 10 mW/m^2 می‌باشد) [۴۱].

فصل سوم:

کاربرد روش‌های مرکزبایی، مدل سازی پیشرو و طیف دی-
فرکتال شده روی مثال مصنوعی

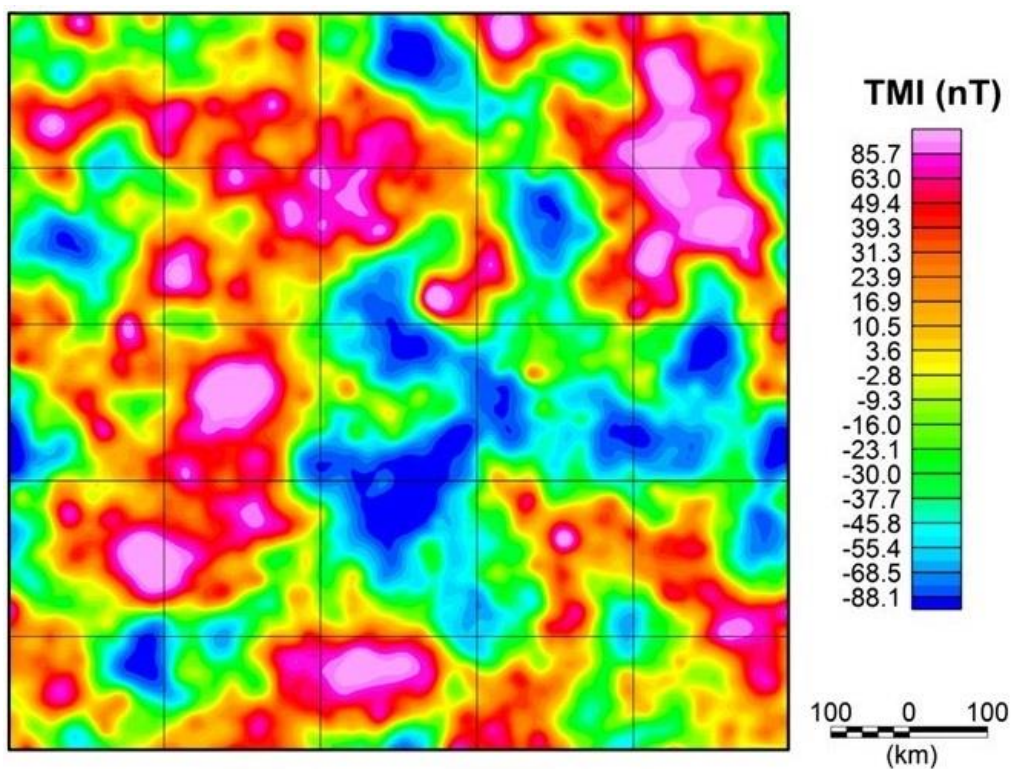
۳-۱- مقدمه

روش‌های مختلف ارائه شده در فصل گذشته در صورتی مفید هستند که در عمل برای داده‌های واقعی نیز نتایج مطلوبی را فراهم کنند. در این فصل به منظور بررسی و مقایسه‌ی این روش‌ها آن‌ها را بر روی مثال مصنوعی مورد آزمایش قرار خواهیم داد. در انتهای این فصل به مقایسه و بررسی مشکلات و محدودیت‌های هر یک از این روش‌ها خواهیم پرداخت. لازم به ذکر است در این پایان‌نامه از مدل استاندارد تهیه شده توسط سالم و همکاران (۲۰۱۴) استفاده خواهد شد.

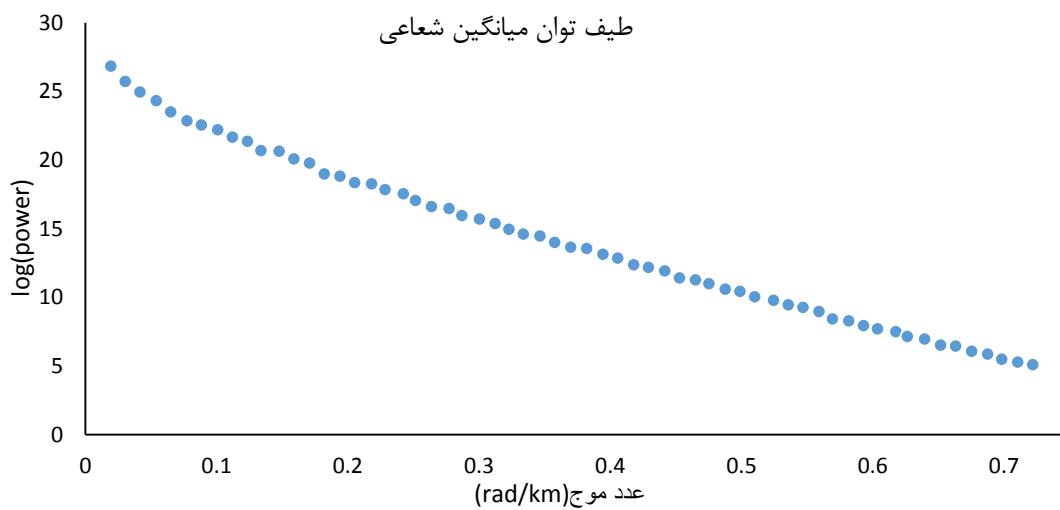
۳-۲- مشخصات مدل مصنوعی

بررسی روش‌های مختلف روی مدل مصنوعی به منظور مقایسه‌ی روش‌ها، تاثیر زیادی جهت به کارگیری روش بهتر دارد. در این تحقیق از مدل مصنوعی تولید شده توسط سالم^۱ و همکاران (۲۰۱۴) بهره برده‌ایم [۱۹]. آن‌ها مدلی با عمق بالای ۱۰ کیلومتر و عمق پایین ۲۰ کیلومتر را با شاخص فرکتالی $\alpha = 3$ طبق روش پیلکینتون و همکاران (۱۹۹۴) [۴۲] تولید کردند. در شکل (۳-۱) نقشه‌ی میدان مغناطیسی کل تولید شده با مدل مصنوعی را مشاهده می‌کنید. در شکل (۳-۲) نمودار لگاریتم طیف توان - عدد موج محاسبه شده از مدل مصنوعی را مشاهده می‌کنید.

^۱ salem



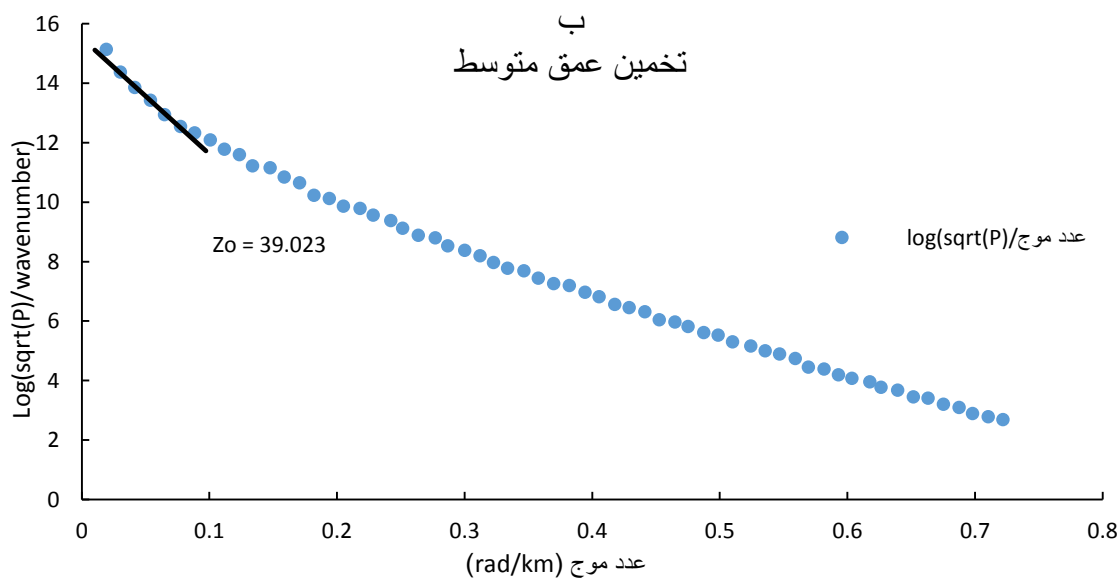
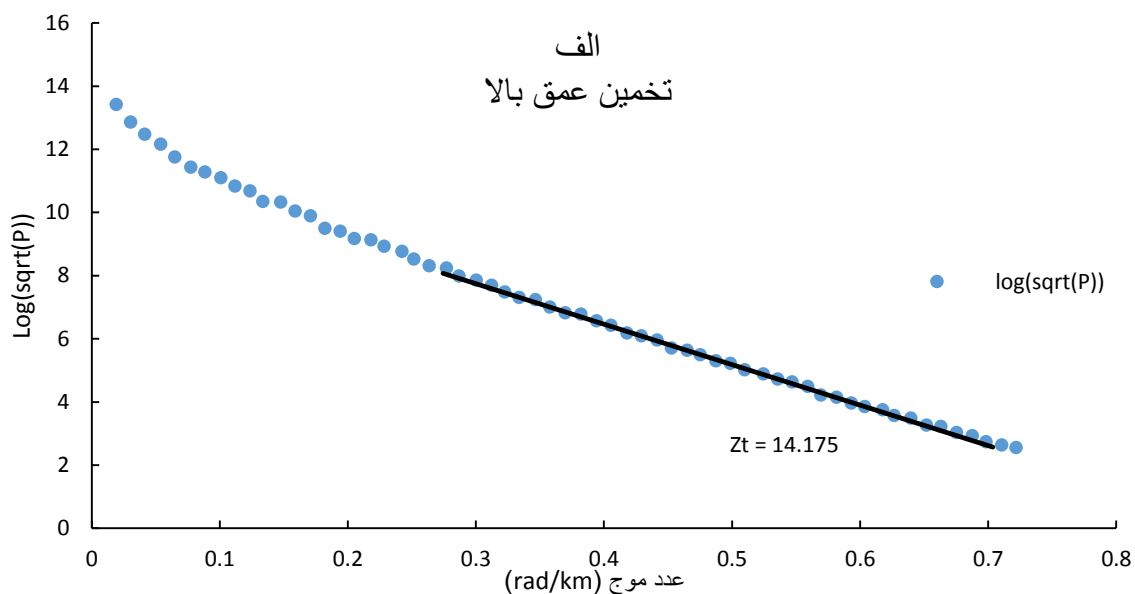
شکل (۱-۳) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل حاصل از مدل مصنوعی با عمق بالای ۱۰ کیلومتر و عمق پایین ۲۰ کیلومتر و شاخص فرکتالی $\alpha = 3$ [۱۹].



شکل (۲-۳) نمودار لگاریتم طیف توان میانگین شعاعی - عدد موج حاصل از شکل (۱-۳) [۱۹]

۳-۳- روش مرکز یابی

همان طور که در فصل قبل اشاره شد در این روش ابتدا عمق بالا با استفاده از رابطه‌ی (۲-۸) محاسبه می‌شود سپس برای محاسبه‌ی عمق متوسط از رابطه‌ی (۲-۷) استفاده شده است. نتایج تخمین عمق بالا و عمق متوسط مدل مصنوعی را به ترتیب در شکل (۳-۳) الف و ب مشاهده می‌کنید.



شکل (۳-۳) تخمین عمق بالا با استفاده از روش مرکز یابی (الف). تخمین عمق متوسط با استفاده از روش مرکز یابی (ب)

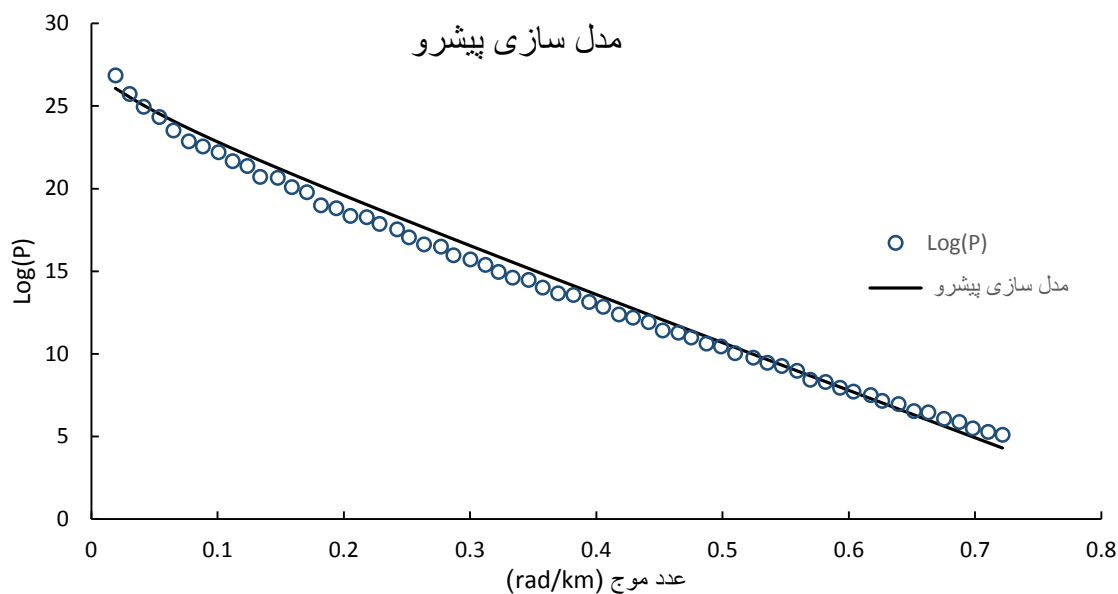
همان طور که در شکل مشاهده می شود با برازش خط مستقیم به داده های عدد موج بین ۰/۴ تا ۰/۶ عمق بالا $Z_1 = 14/175$ کیلومتر و با برازش خط مستقیم به داده های عدد موج کمتر از ۰/۱ عمق متوسط $Z_0 = 39/025$ کیلومتر محاسبه شده است. ذکر این نکته ضروری است که اعداد بدست آمده از این روش مربوط به شیب نمودار در قسمت های مختلف می باشد و در عمل این روش از دقت کافی برای تخمین عمق با این تعداد ارقام اعشار نمی باشد. لذا از این پس اعداد رند شده و نتایج فقط با یک یا دو رقم اعشار بیان می شود. با توجه به فرمول (۲-۹) عمق کف مدل به صورت زیر محاسبه می شود:

$$(2 \times 39/1) - 14/2 = 64 \text{ km}$$

از مشکلات این روش انتخاب بازه ی عدد موجی است که باید خط را بر آن برازش دهیم. برای انجام این کار ملاک خاصی ارائه نشده است و فقط به نظر محقق و تجربه ی او بستگی دارد. با توجه به نتایج، عمق کف به دست آمده خطای بسیار بالایی دارد و این مسئله به دلیل در نظر نگرفتن خاصیت فرکتالی می باشد که اساسی ترین مشکل استفاده از این روش است.

۳-۴- روش مدل سازی پیشرو

همانطور که در فصل قبل اشاره شد روات و همکاران (۲۰۰۴) با ارائه رابطه (۲-۴) روش جدیدی جهت بهبود تخمین عمق کف بی هنجاری های مغناطیسی ارائه کردند. در این روش با استفاده از رابطه (۲-۴) به طور همزمان عمق بالا و عمق کف بی هنجاری مغناطیسی تخمین زده می شود. مهمترین مزیت استفاده از این روش تخمین همزمان عمق بالا و کف بی هنجاری های مغناطیسی و حذف مرحله ی تخمین عمق متوسط می باشد. نتایج استفاده از روش مدل سازی پیشرو، روی مدل مصنوعی قبل را در شکل (۳-۴) مشاهده می کنید.



شکل (۴-۳) نتیجه‌ی استفاده از روش مدل سازی پیشرو. عمق بالا ۱۳/۸ کیلومتر و عمق کف ۵۸ کیلومتر محاسبه شده‌است.

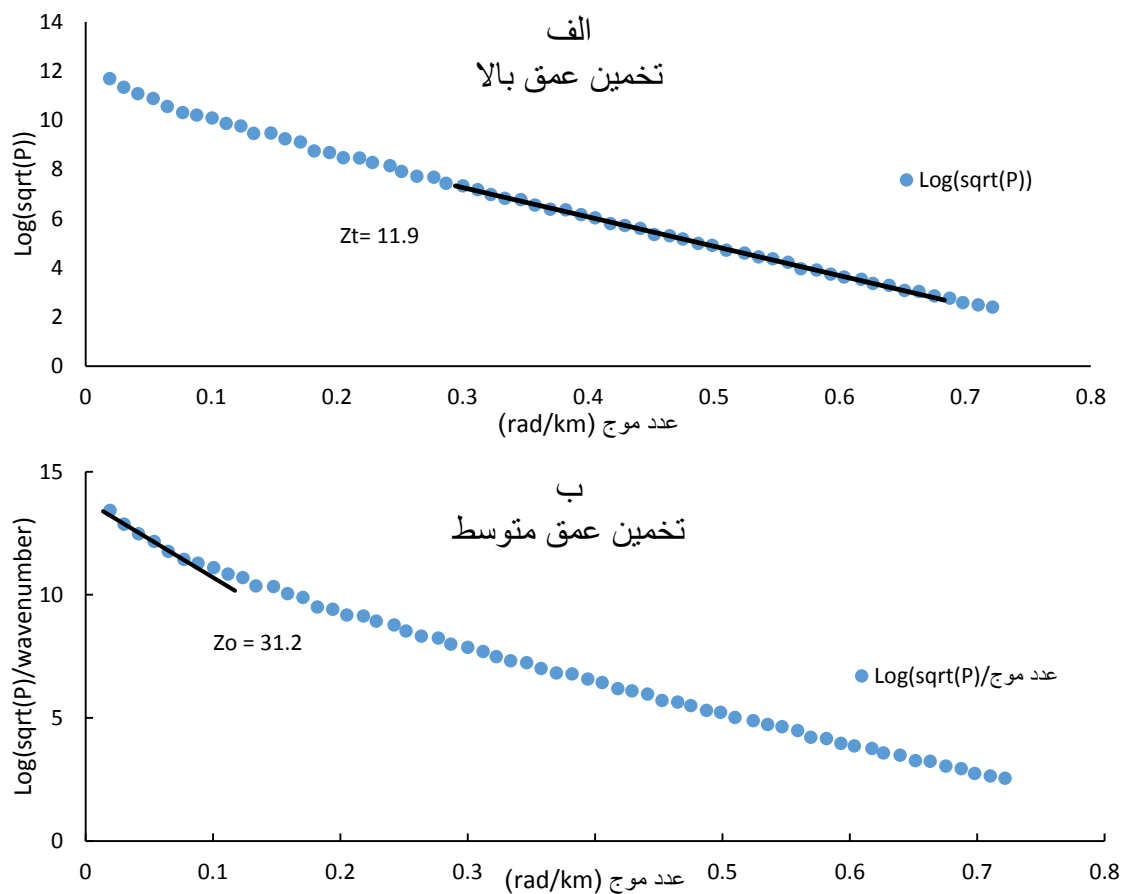
همان‌طور که در شکل (۴-۳) مشاهده می‌کنید مدل برازش نسبتاً خوبی دارد. عمق بالا با استفاده از این روش ۱۳/۸ کیلومتر و عمق کف ۵۸ کیلومتر محاسبه شده است بنابراین نتایج بهتری نسبت به روش مرکزبایی به‌دست آمده است، اما این نتایج هم‌چنان به دور از واقعیت است. این روش نیز مانند روش قبلی خاصیت فرکتالی را در نظر نمی‌گیرد، بنابراین نتایج بدست آمده با خطای بالایی همراه است.

۳-۵- روش تخمین عمق با طیف دی-فرکتال شده

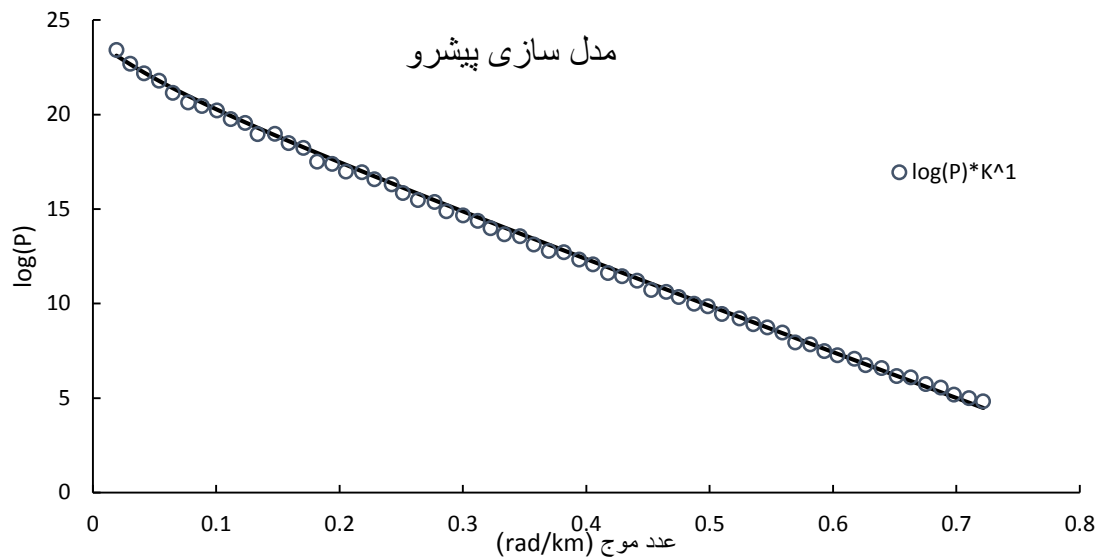
پارامتر فرکتالی β به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد، حتی محاسبه‌ی آن با روش‌های وارون سازی مشکلات خاص خود را دارد [۱۵]. سالم و همکاران (۲۰۱۴) روش جدیدی برای حذف اثر فرکتالی از طیف توان میانگین شعاعی ارائه دادند. آن‌ها درصدد بودند اثر فرکتالی را طبق رابطه (۲-۱۳) از روی طیف توان میانگین شعاعی حذف کنند [۱۹]. همان‌طور که اشاره شد، مشکل اصلی عدم توانایی در اندازه‌گیری

پارامتر فرکتالی است. آن‌ها برای حذف اثر فرکتالی روشی بسیار خلاقانه ابداع کردند. این روش طبق نمودار گردشی شکل (۴-۲) بر روی مدل مصنوعی اعمال شده است.

ابتدا باید با مقدار کم α شروع کری. در قسمت قبل مقدار $\alpha = 0$ در نظر گرفته شده است، که در این صورت مقدار $\beta = 1$ می‌باشد. با در نظر گرفتن مقدار $\beta = 1$ این روش بسیار به روش مدل‌های مغناطیسی تصادفی نزدیک است. در قدم بعدی مقدار $\alpha = 1$ لحاظ می‌شود و با دو روش مرکزبایی و مدل‌سازی پیشرو به تخمین عمق بالا، متوسط و کف مدل مصنوعی پرداخته می‌شود. در شکل (۵-۳) می‌توانی نتایج مربوط به روش مرکزبایی و در شکل (۶-۳) نتایج حاصل از روش مدل‌سازی پیشرو را برای مقدار $\alpha = 1$ مشاهده نمود.

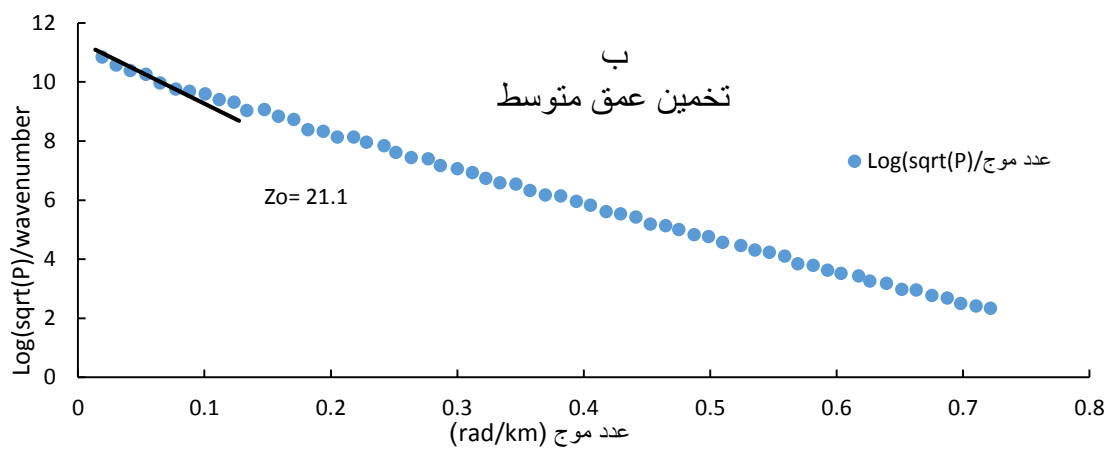
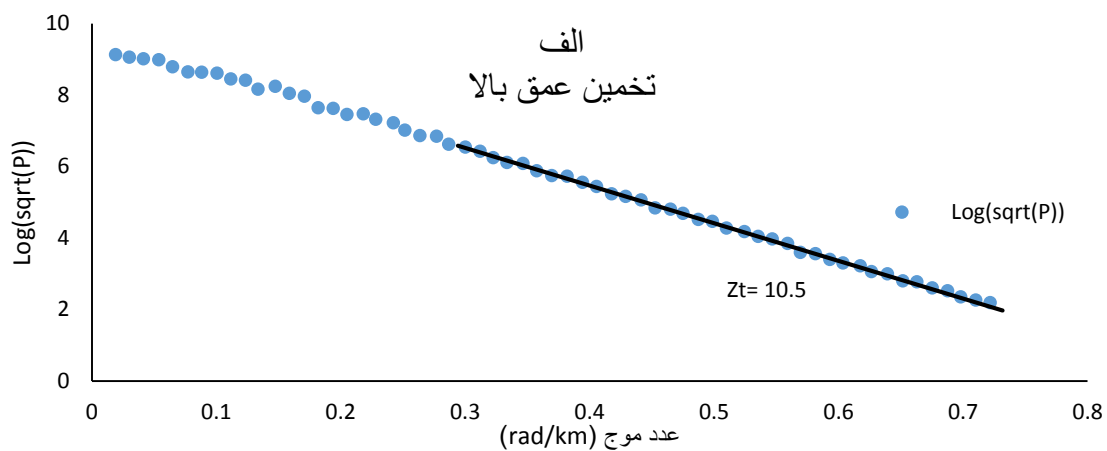


شکل (۵-۳) تخمین عمق بالا با استفاده از روش مرکزبایی (الف). تخمین عمق متوسط با استفاده از روش مرکزبایی (ب).

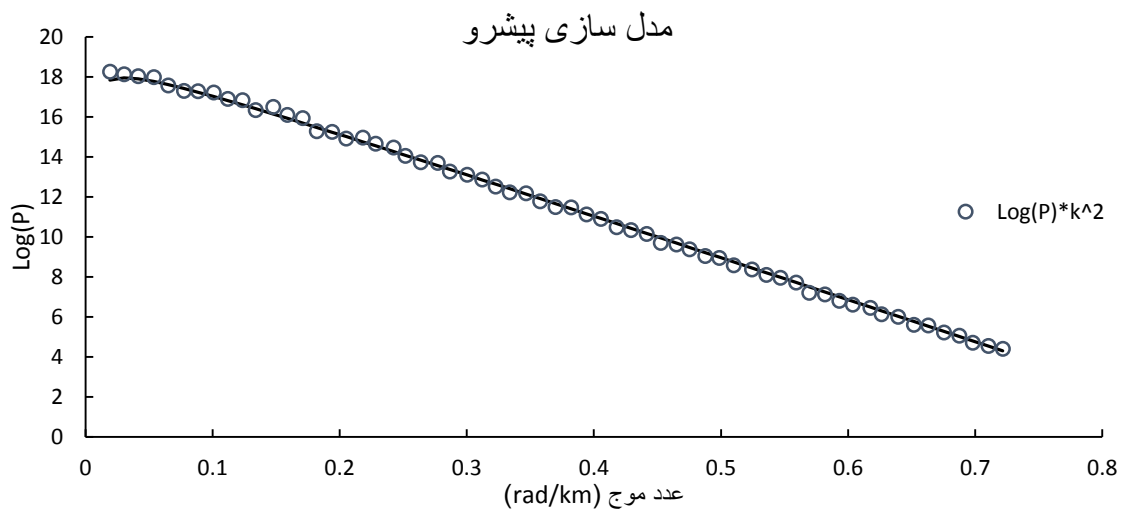


شکل (۳-۶) نتیجه‌ی استفاده از روش مدل سازی پیشرو. عمق بالا ۱۱/۶ کیلومتر و عمق کف ۴۸/۵ کیلومتر محاسبه شده.

با افزایش مقدار شاخص فرکتالی به اندازه‌ی یک واحد، نتایج تخمین عمق کمی به واقعیت نزدیک شده است. با استفاده از روش مرکزبایی طبق رابطه (۲-۹) عمق کف برابر ۵۰/۵ کیلومتر تخمین زده شد. از روش مدل سازی پیشرو نتایج بهتری حاصل شد اما این نتایج هنوز به دور از واقعیت است. در ادامه مقدار شاخص فراکتالی $\alpha = 2$ در نظر می‌گیریم و عمق بالا، متوسط و کف مدل را تخمین می‌زنیم. در شکل (۳-۷) می‌توانید نتایج مربوط به روش مرکزبایی و در شکل (۳-۸) نتایج حاصل از روش مدل سازی پیشرو را برای مقدار $\alpha = 2$ مشاهده کنید.



شکل (۳-۷) تخمین عمق بالا با استفاده از روش مرکز یابی (الف). تخمین عمق متوسط با استفاده از روش مرکز یابی (ب)

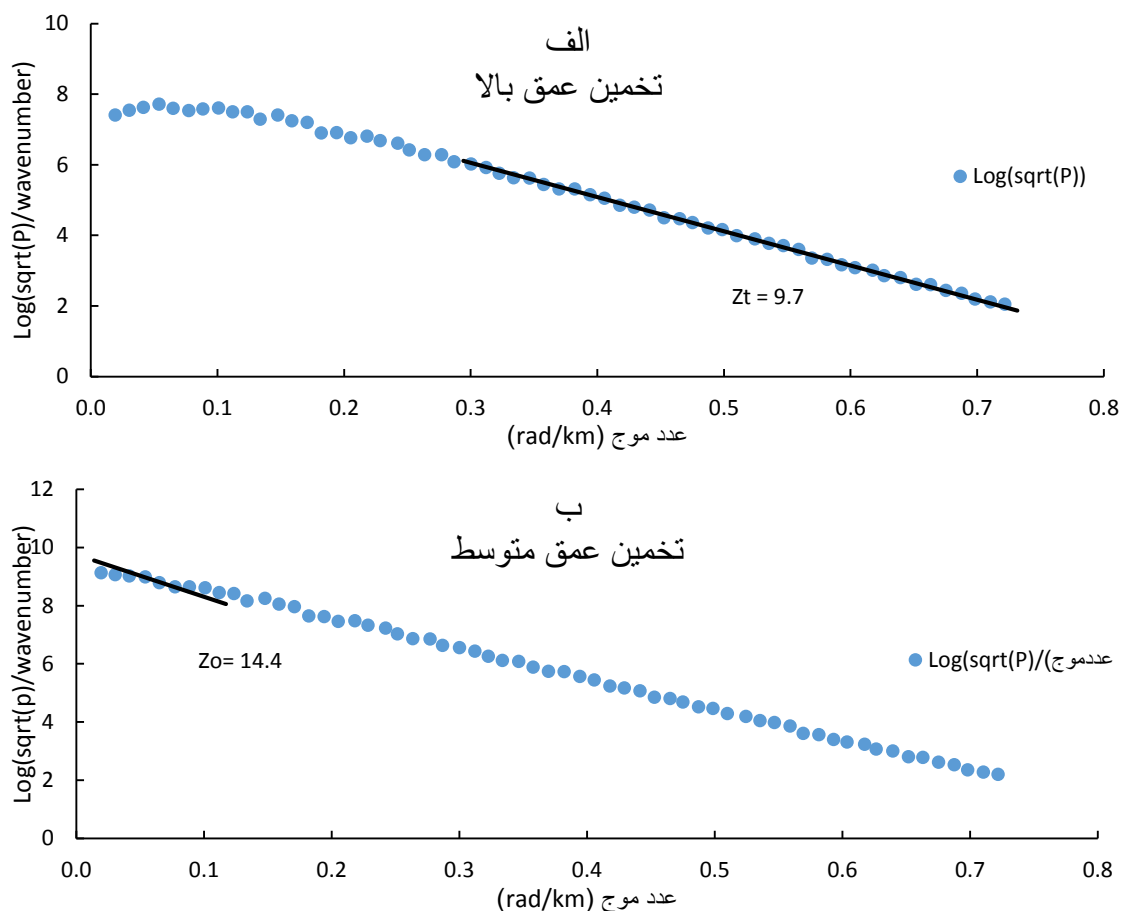


شکل (۳-۸) نتیجه‌ی استفاده از روش مدل سازی پیشرو. عمق بالا ۱۰/۸ کیلومتر و عمق کف ۳۴/۷ کیلومتر محاسبه شده.

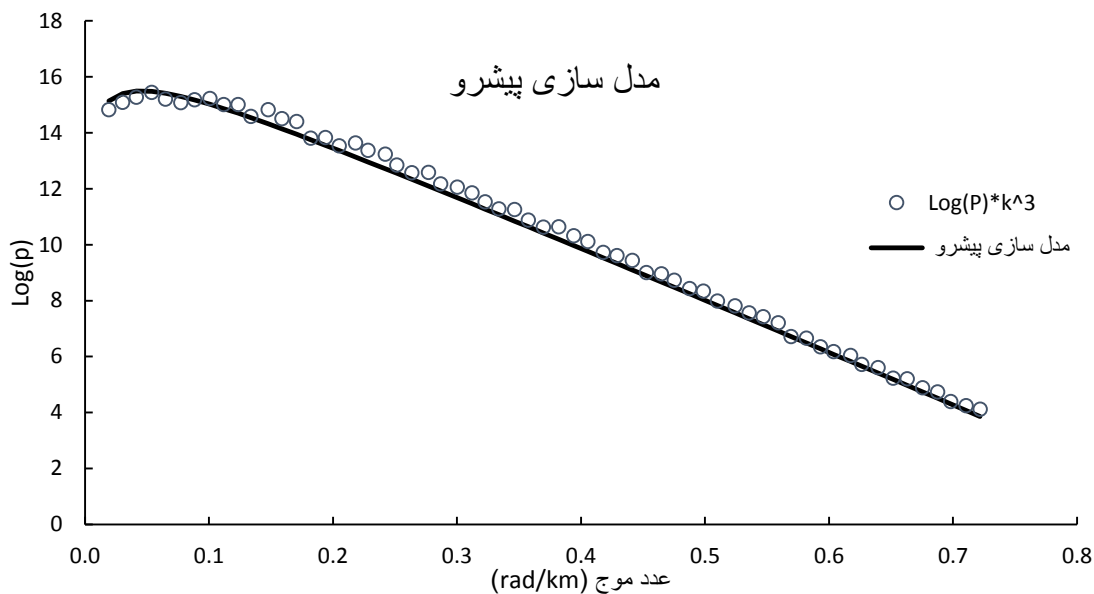
با در نظر گرفتن مقدار $\alpha = 2$ عمق کف به روش مرکز یابی طبق رابطه (۲-۹) برابر $31/7$ کیلومتر برآورد شده است، که نتیجه‌ی بهتری را نسبت به روش مدل سازی پیشرو نشان می‌دهد. این اختلاف می‌تواند به دلیل استفاده از بازه‌ی عدد موج مناسب حاصل شده باشد، اما دلیل قطعی برای آن وجود ندارد.

در ادامه مقدار شاخص فرکتالی $\alpha = 3$ قرار می‌دهیم. این مقدار واقعی در نظر گرفته شده هنگام تولید مدل مصنوعی است، بنابراین می‌توان توقع داشت که تخمین بهتری نسبت به حالت‌های قبلی حاصل شود.

در شکل (۳-۹) می‌توانید نتایج مربوط به روش مرکز یابی و در شکل (۳-۱۰) نتایج حاصل از روش مدل سازی پیشرو را برای مقدار $\alpha = 3$ مشاهده نمود.



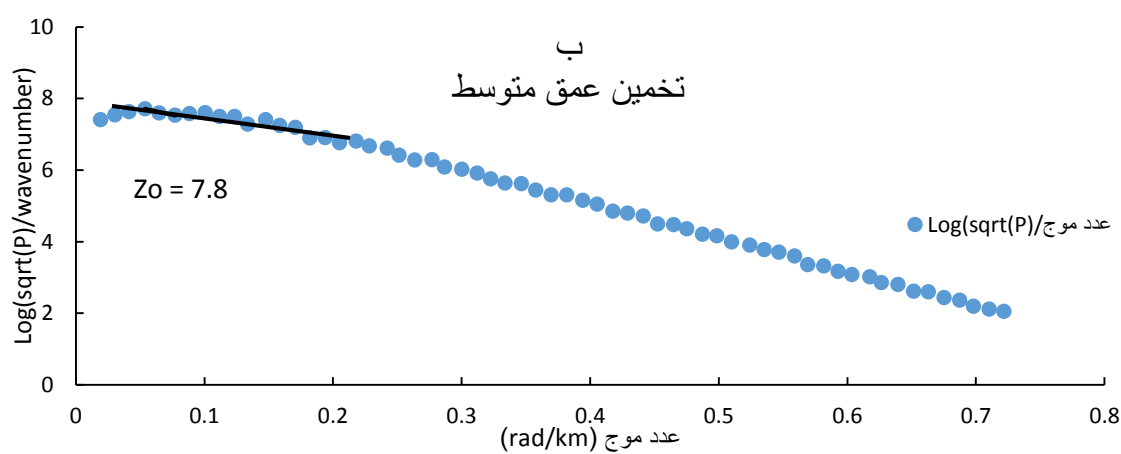
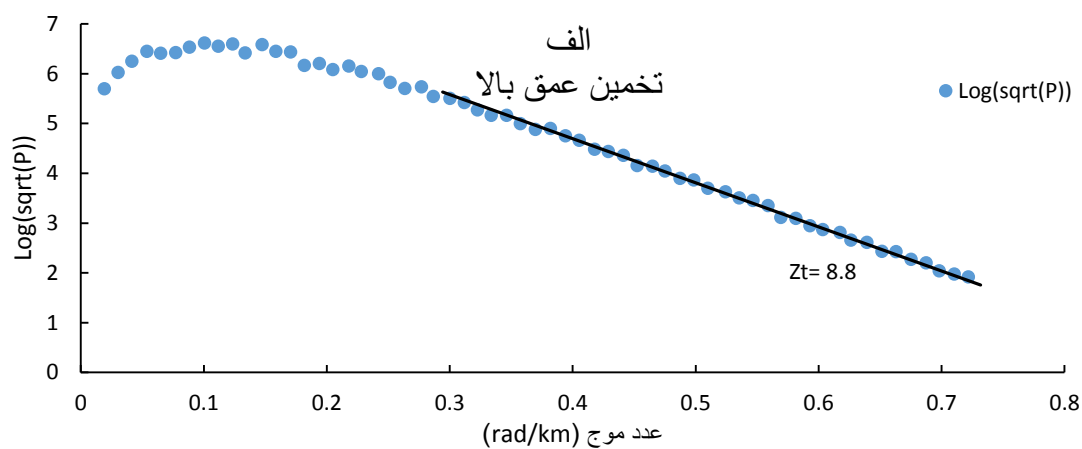
شکل (۳-۹) تخمین عمق بالا با استفاده از روش مرکز یابی (الف). تخمین عمق متوسط با استفاده از روش مرکز یابی (ب).



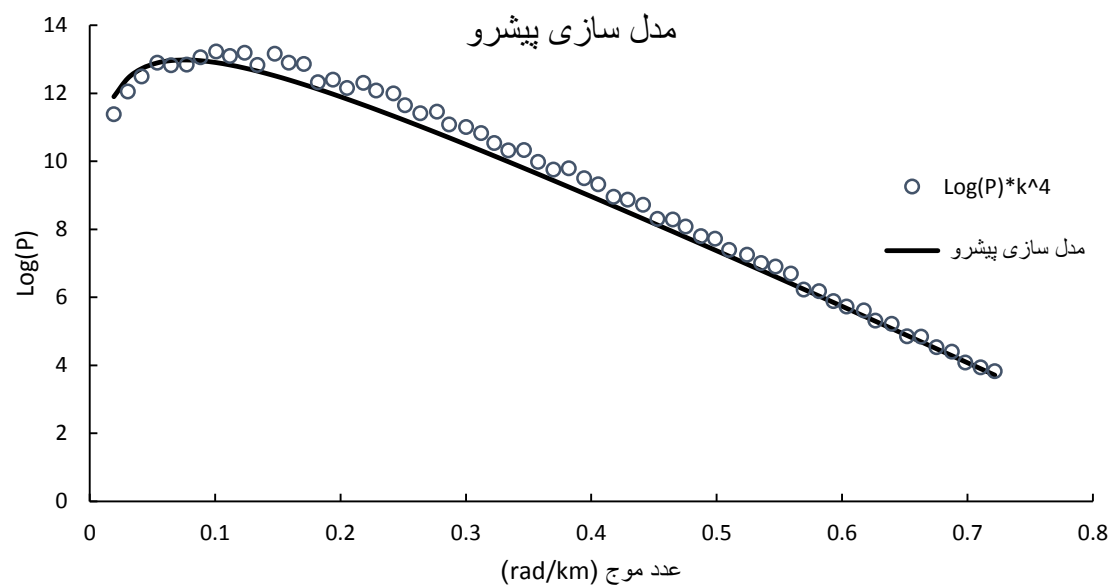
شکل (۳-۱۰) نتیجه استفاده از روش مدل سازی پیشرو. عمق بالا ۹/۷ کیلومتر و عمق کف ۲۰/۳ کیلومتر محاسبه شده.

با اعمال مقدار واقعی شاخص فرکتالی $\alpha = 3$ عمق بالا با روش مرکز یابی ۹/۷ کیلومتر و عمق کف طبق رابطه (۲-۹) برابر ۱۹/۳ کیلومتر تخمین زده شد، که در تخمین عمق بالا ۰/۳ و در تخمین عمق کف ۰/۷ کیلومتر اختلاف وجود دارد. با استفاده از روش مدل سازی پیشرو عمق بالا ۹/۷ کیلومتر تخمین زده شد که کاملاً مشابه روش مرکز یابی است اما با این روش عمق کف را بهتر و برابر ۲۰/۳ کیلومتر برآورد کردیم که اختلاف ۰/۳ کیلومتری را با مقدار واقعی نشان می دهد.

نکته‌ی قابل توجه این است که در این حالت برای اولین بار می توانید پیک را در طیف مشاهده کنید. در ادامه برای بررسی بیشتر مقدار شاخص فرکتالی را برابر $\alpha = 4$ در نظر گرفته می شود تا بتوان تخمین عمق بالا، متوسط و کف مدل را انجام داد. در شکل (۳-۱۱) می توان نتایج مربوط به روش مرکز یابی و در شکل (۳-۱۲) نتایج حاصل از روش مدل سازی پیشرو را برای مقدار $\alpha = 4$ مشاهده نمود.



شکل (۳-۱۱) تخمین عمق بالا با استفاده از روش مرکزیابی (الف). تخمین عمق متوسط با استفاده از روش مرکزیابی (ب).



شکل (۳-۱۲) نتیجه‌ی استفاده از روش مدل سازی پیشرو. عمق بالا ۹ کیلومتر و عمق کف ۱۶ کیلومتر محاسبه شده.

با توجه به نتایج به دست آمده، محاسبه‌ی عمق کف با روش مرکز یابی در این حالت امکان پذیر نمی باشد. زیرا عمق متوسط کمتر از عمق بالا تخمین زده شده است. اما از این اشکال می توان به صورت یک مزیت بهره برد. که در ادامه بیشتر به آن خواهیم پرداخت. نتایج به دست آمده برای روش مدل سازی پیشرو نیز قابل قبول نیست.

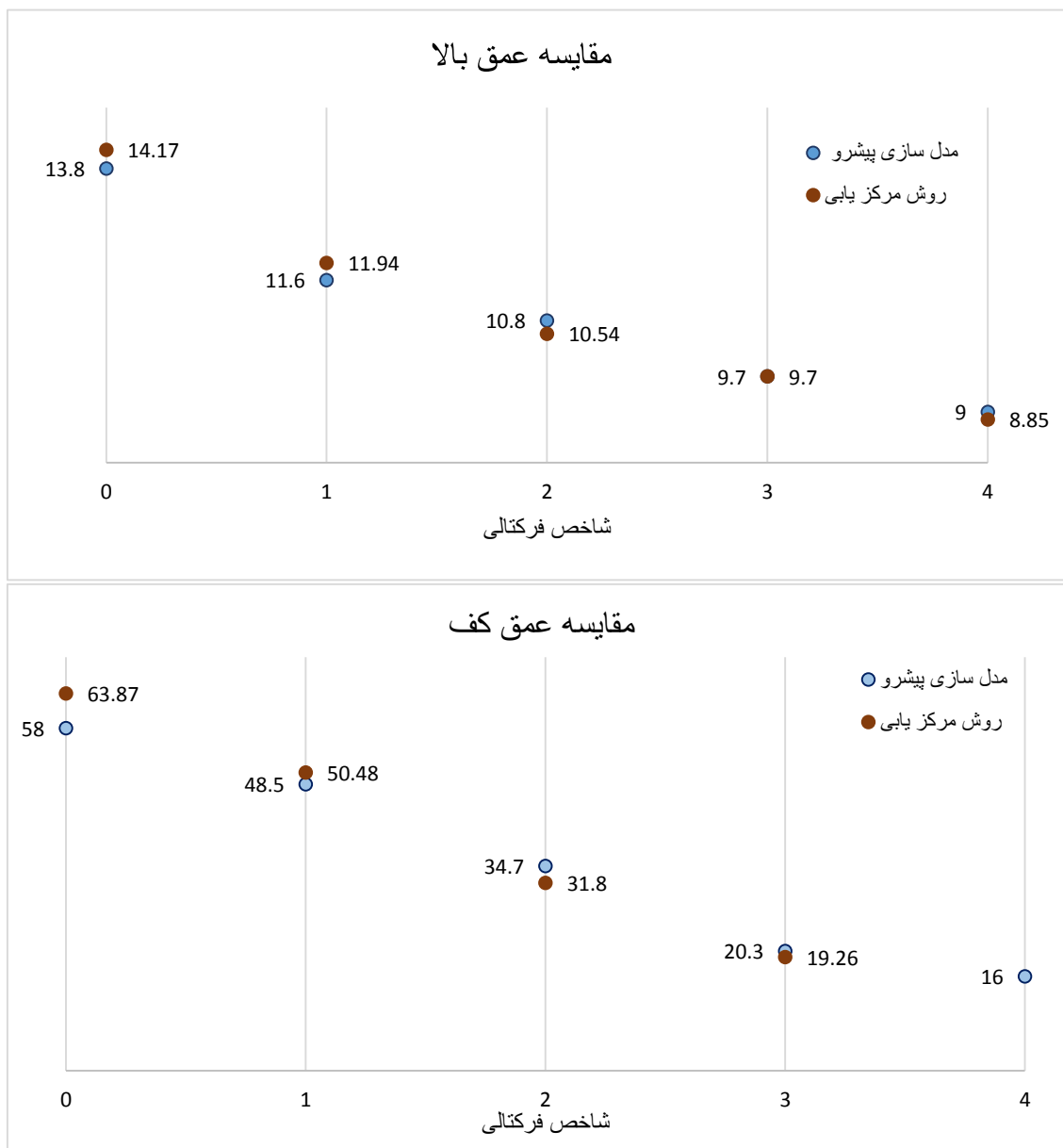
۳-۶- مقایسه و نتیجه گیری

در جدول (۱-۳) نتایج حاصل از روش های مختلف به صورت خلاصه ارائه شده است. شکل (۳-۱۲) قسمت الف مقایسه بین نتایج تخمین عمق بالا با شاخص های فرکتالی متفاوت و قسمت ب مقایسه نتایج بین تخمین عمق کف مدل مصنوعی را با در نظر گرفتن شاخص فرکتالی متفاوت و با استفاده از دو روش مرکز یابی و مدل سازی پیشرو نشان می دهد.

جدول (۳-۱) نتایج حاصل از تخمین عمق به روش های مرکز یابی و مدل سازی پیشرو با شاخص های فرکتالی متفاوت.

عمق کف	عمق متوسط	عمق بالا	نوع روش	شاخص فرکتالی
۶۳،۸۷	۳۹،۰۲	۱۴،۱۷	مرکز یابی	-
۵۸	-	۱۳،۸	پیشرو	-
۵۰،۴۸	۳۱،۲۱	۱۱،۹۴	مرکز یابی	۱
۴۸،۵	-	۱۱،۶	پیشرو	۱
۳۱،۸	۲۱،۱۷	۱۰،۵۴	مرکز یابی	۲
۳۴،۷	-	۱۰،۸	پیشرو	۲
۱۹،۲۶	۱۴،۴۸	۹،۷	مرکز یابی	۳
۲۰،۳	-	۹،۷	پیشرو	۳
*	۷،۷۹	۸،۸۵	مرکز یابی	۴
۱۶	-	۹	پیشرو	۴

*امکان محاسبه‌ی عمق کف در این حالت وجود ندارد.



شکل (۳-۱۳) مقایسه‌ی نتایج بدست آمده با روش‌های مرکز یابی و مدل سازی پیشرو با شاخص‌های فرکتالی متفاوت.

با بررسی نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که روش مدل سازی پیشرو به دلیل محاسبه‌ی مستقیم عمق کف از دقت بالاتری برخوردار است. انتخاب بازه‌ی عدد موج مناسب در روش مرکز یابی برای تخمین عمق بالا و عمق متوسط تاثیر بسیاری دارد که این مسئله کاملاً به نظر محقق بستگی دارد این امر سبب

می‌شود فرآیند تخمین عمق با دقت کمتری صورت پذیرد. در نظر گرفتن شاخص فرکتالی صحیح به تخمین بهتر عمق کف کمک زیادی می‌کند و همان‌طور که مشاهده می‌کنید در سایر حالات نتایج قابل قبولی حاصل نشده است. البته ذکر این نکته ضروری است که مقدار واقعی شاخص فرکتالی مدل مصنوعی از قبل مشخص است، اما در واقعیت محاسبه‌ی شاخص فرکتالی آسان نیست. در جدول (۳-۱) برای شاخص فرکتالی $\alpha = 4$ امکان محاسبه عمق کف وجود ندارد، زیرا عمق متوسط کمتر از عمق بالا تخمین زده شده است. این اشکال در استفاده از این روش وجود دارد، اما با نگاهی دیگر می‌توان آن را به عنوان مزیت در نظر گرفت و میزان بالا بردن شاخص فرکتالی را محدود کرد. با دانستن این موضوع می‌توان زمان انجام فرآیند تخمین عمق را کاهش داد.

فصل چهارم:

تخمین عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی شمال غرب

ایران

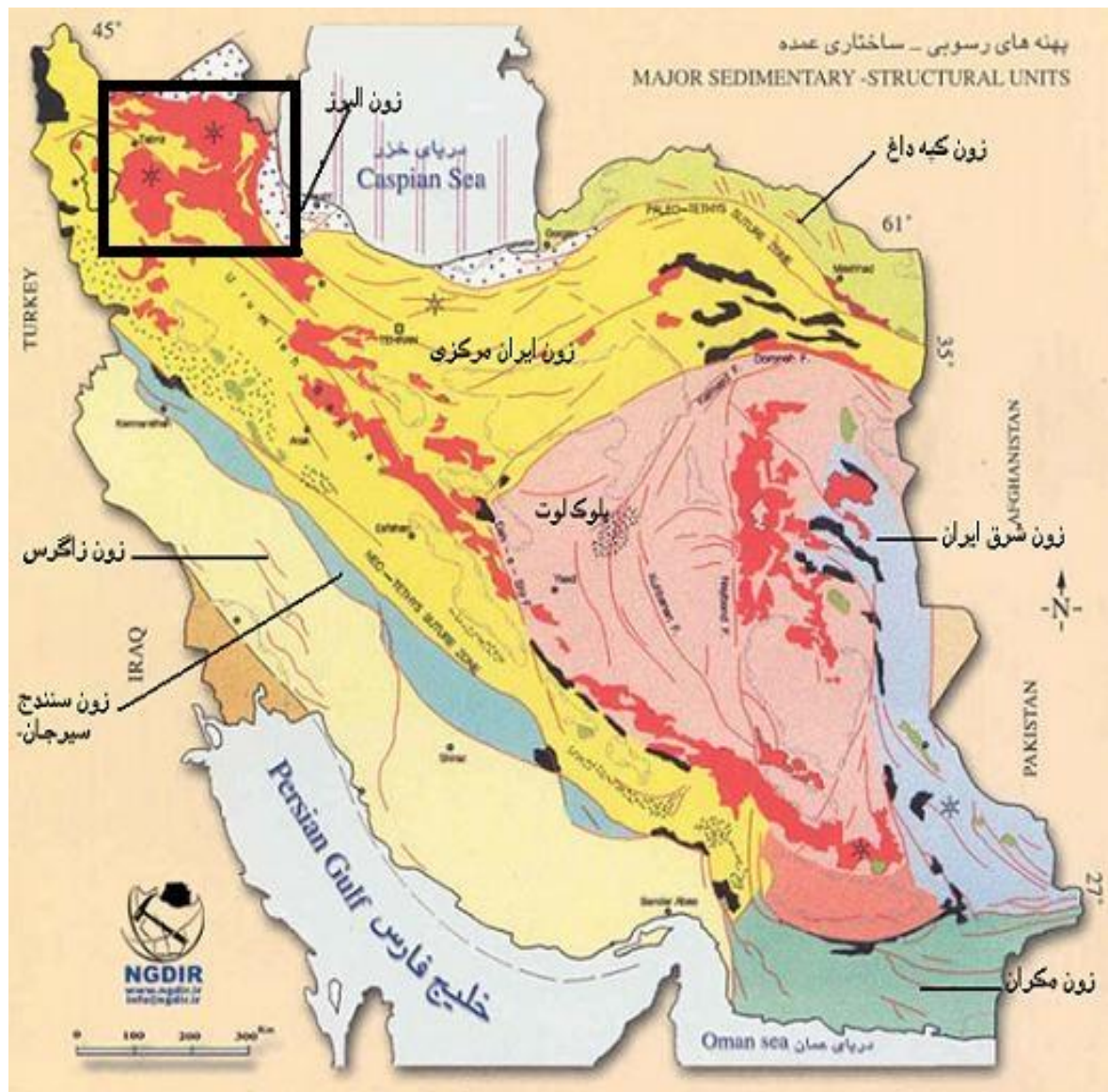
۴-۱- مقدمه

تخمین عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با استفاده از آنالیز طیفی داده‌های مغناطیس هوابرد برای شناسایی مناطق مستعد زمین گرمایی یکی از ابزارهای مهم در مراحل اولیه‌ی اکتشاف منابع زمین گرمایی است. همان‌طور که در فصل یک به آن پرداخته شد عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را می‌توان به عنوان عمق نقطه‌ی کوری در نظر گرفت. در این فصل به ترسیم خطوط تراز عمق نقطه‌ی کوری و تهیه نقشه‌های گرادیان و جریان حرارتی شمال غرب ایران پرداخته می‌شود. برای انجام این کار ابتدا پردازش‌های مورد نیاز بر روی داده‌های مغناطیس هوابرد منطقه انجام می‌گیرد، سپس منطقه پنجره گذاری شده و عمق نقطه‌ی کوری برای هر پنجره با استفاده از روش‌های مختلف تخمین زده می‌شود، آنگاه نقشه‌ی عمق نقطه‌ی کوری، گرادیان و جریان حرارتی منطقه ترسیم و به کمک سایر شواهد و اطلاعات موجود اعتبار سنجی‌های لازم صورت می‌گیرد.

۴-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه و زمین‌شناسی شمال غرب ایران

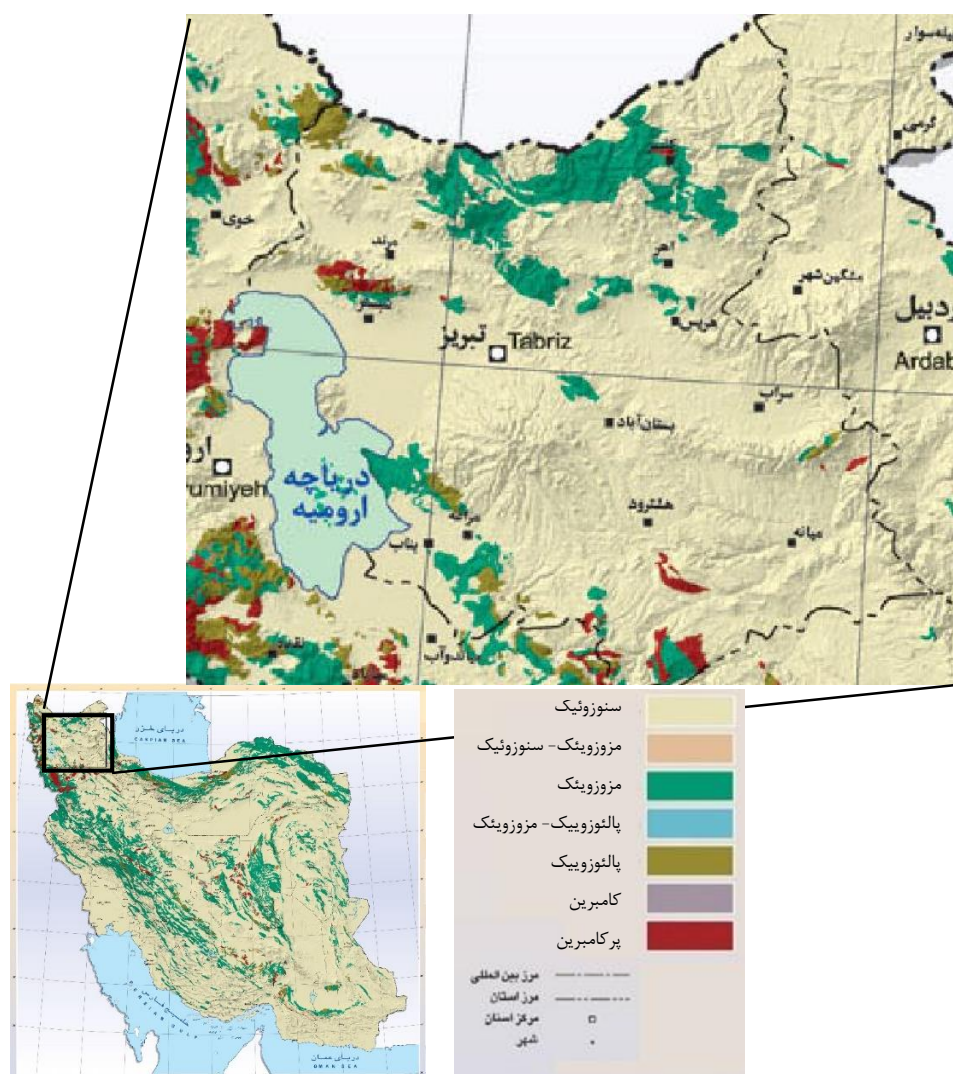
از دیدگاه زمین‌شناسی ساختمانی و بر اساس تقسیم بندی‌های انجام شده شمال غرب ایران از دو بخش ساختاری تشکیل شده است که بخش غربی و جنوب غربی آن دنباله‌ی پلاتفرم پالئوزوئیک ایران مرکزی و البرز غربی است (شکل ۴-۱)). این بخش شامل کوه‌های بزگوش - سهند و ارتفاعات شمال تبریز (کوه‌های میشو و مرو) و ارتفاعات غرب جلفا است. بخش شمال شرق آذربایجان ظاهراً فاقد رخساره‌های پلاتفرمی پالئوزوئیک شبیه سایر قسمت‌های ایران بوده و رخساره‌های فلیش مزوزوئیک در آن گستردگی زیادی داشته و در بخشی نیز رخساره‌ی رسوبات ترشیاری از ویژگی خاصی برخوردار است. این بخش، حوضه‌ی رسوبی دشت مغان و ارتفاعات اطراف اهر و خروانق را تشکیل می‌دهد. سنگ‌ها و سازندهای دوران پالئوزوئیک بیشتر از انواع سنگ‌های رسوبی و آذرین از نوع درونی هستند که تقریباً در تمامی کوه‌های این

استان به ویژه کوه‌های مروداغی و میشو داغی، صوفیان و بخش‌هایی از شمال مرند و غیره دیده می‌شوند. سنگ‌ها و سازندهای مزوزوئیک نیز بیشتر رسوبی هستند.

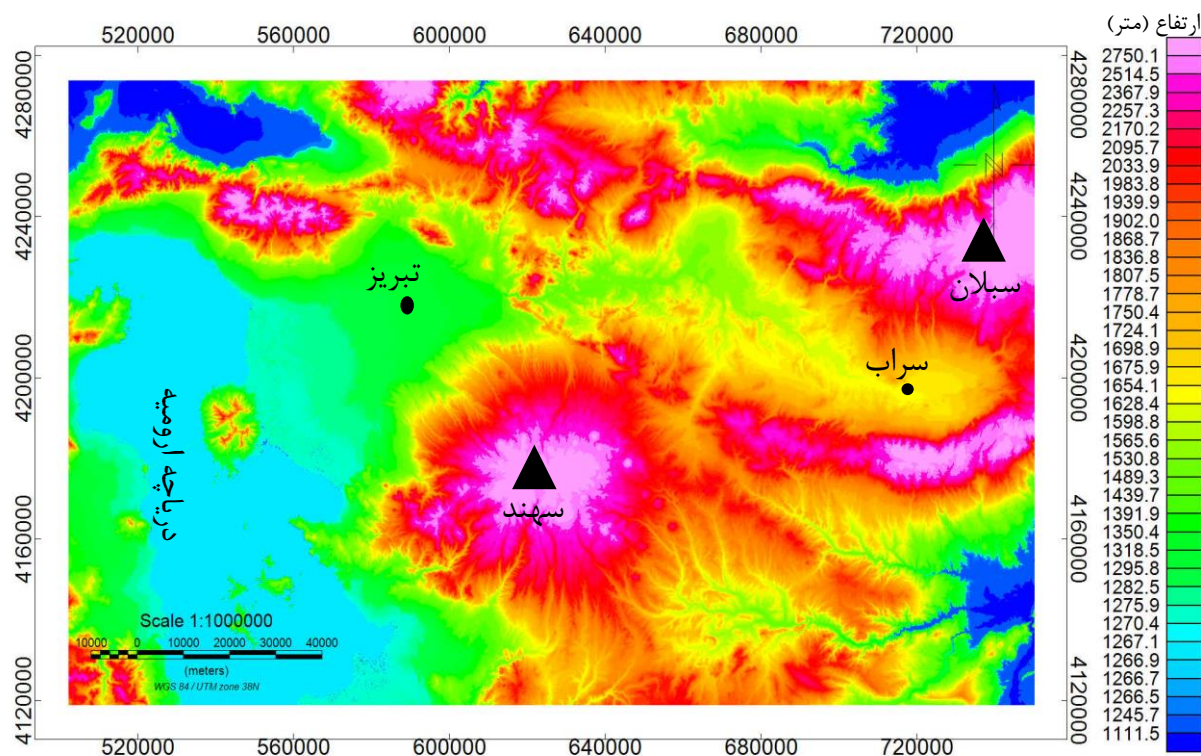


شکل (۴-۱) نقشه‌ی واحدهای ساختاری-رسوبی ایران (مستطیل سیاه منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد) [۴۳].

دردوران سنوزوئیک سنگ‌های آذرین (درونی و بیرونی) به ویژه بیرونی و آذر آواری مانند انواع توف‌ها و برش‌های ولکانیکی پهنه‌های وسیعی از این منطقه را زیر پوشش دارند [۴۴] توده‌های نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی، که از شاخصه‌های اصلی وجود پتانسیل زمین‌گرمایی می‌باشند، سطح وسیعی از منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص می‌دهند که در این میان سنگ‌های آتشفشانی حد واسط ائوسن تا میوسن از بیشترین سهم برخوردارند شکل (۲-۴).



شکل (۲-۴) نقشه‌ی ساده شده زمین‌شناسی ایران بر پایه سن (مستطیل سیاه منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۴۵].

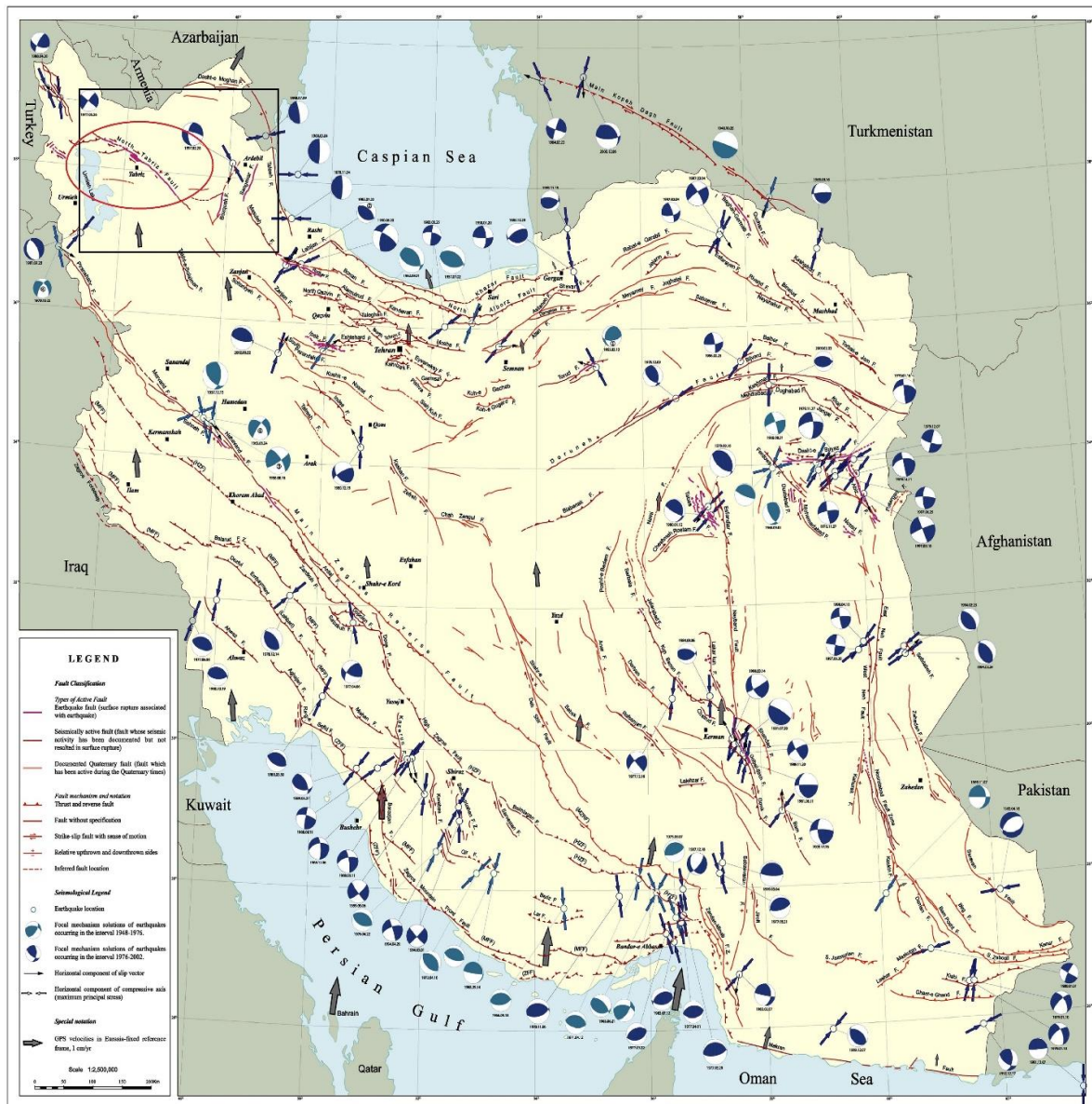


شکل (۳-۴) نقشه‌ی توپوگرافی شمال غرب ایران تهیه شده از مدل رقومی ارتفاع ۹۰ متر سازمان زمین‌شناسی کشور.

تأثیرات تکتونیکی، برپایی عظیم آتشفشان‌های سبلان و سهند، در اواخر ترسیر و کواترنر، یکی از مشخصه‌های مهم این منطقه است. گدازه‌های بازالتی آتشفشان بزرگ آرارات که در کشور ترکیه واقع شده، بخشی از دشت‌های شمال غربی آذربایجان (ماکو) را پوشانده که گواهی بر آخرین فعالیت‌های آتشفشانی در این منطقه می‌باشد. بلندترین نقطه‌ی این منطقه در قله‌ی سهند دارای ارتفاع ۳۸۱۴ متر بوده و گودترین منطقه نیز در حوضه‌ی رسوبی دشت مغان که خود بخشی از زون فرو افتاده‌ی کورا - ارس که آن‌هم احتمالاً باقیمانده حوضه بزرگ رسوبی اقیانوس تتیس بوده، واقع شده است که دارای ارتفاعی حدود ۵۰ متر بالاتر از سطح دریای آزاد می‌باشد شکل (۳-۴) [۴۴].

اصلی‌ترین گسل این منطقه گسل تبریز نام دارد که دارای حالت ترکیبی می‌باشد، بدین معنا که خود از به هم پیوستن چند گسل دیگر تشکیل شده است. آخرین حرکت این گسل از نوع راستگرد بوده و طول

آن از جنوب ابهر تا کوه آرارات بیش از ۶۰۰ کیلومتر است. حرکات و جا به جایی گسل تبریز در فوران‌های آتشفشانی پلیو-کواترنر سهند تاثیر داشته و به دنبال آن چشمه‌های آب گرم بستان آباد بوجود آمده است (شکل (۴-۴)) [۴۶].



شکل (۴-۴) نقشه‌ی گسل‌های فعال ایران (مستطیل سیاه رنگ منطقه مورد مطالعه و دایره قرمز گسل تبریز را نشان می‌دهد) [۴۷].

۴-۳- داده‌ها و پنجره‌گذاری

۴-۳-۱- نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی

در اکتشافات مناطق زمین‌گرمایی، برداشت‌های مغناطیس‌سنجی بیشتر به منظور مشخص کردن توده‌های نفوذی پنهان و تخمین عمق احتمالی آن‌ها و یا جهت مشخص کردن گسل‌ها و دایک‌های پنهان انجام می‌شود. پیمایش‌های مغناطیس‌سنجی برای یافتن مناطقی که در آن‌ها خاصیت مغناطیسی سنگ‌ها به دلیل فعالیت گرمایی کم است، انجام می‌شود. اندازه‌گیری‌ها برای ساختارهای محلی مانند گسل‌ها و دایک‌ها بر روی پروفیل‌های موازی و یا یک شبکه برداشت انجام می‌شود. در اندازه‌گیری‌های مغناطیس‌سنجی که در آن هدف آشکارسازی و تهیه نقشه‌ی بی‌هنجاری‌های بزرگ مانند توده‌های نفوذی عمیق، حوزه‌های رسوبی و تخمین عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی است، از روش مغناطیس‌سنجی هوابرد استفاده می‌شود، که در آن ارتفاع پرواز و فاصله‌ی خطوط پروازی به چگالی مورد نیاز داده‌ها و سطح زمین بستگی دارد. در انتها نتایج به صورت نقشه‌های تراز ترسیم می‌شود [۴۷].

بیشتر برداشت‌های مغناطیس‌سنجی در هوا توسط سنجنده‌های متصل به هواپیما و بالگرد انجام می‌شود. برداشت‌های مغناطیس‌هوابرد سریع و از نظر اقتصادی در وسعت‌های بزرگ با صرفه هستند، هزینه‌ی این برداشت‌ها در هر کیلومتر ۴۰ درصد کمتر از هزینه برداشت‌های زمینی است. با استفاده از این روش می‌توان داده‌های مغناطیسی را در ابعاد وسیع و با سرعت بالا برداشت کرد. یکی دیگر از مزیت‌های این نوع برداشت دسترسی به مکان‌هایی است که در برداشت‌های زمینی غیر قابل دسترسی هستند. مهم‌ترین مسئله در برداشت‌های مغناطیس‌هوابرد تعیین موقعیت پرنده در زمان برداشت است که امروزه این مشکل با وجود سیستم موقعیت‌یاب جهانی تا حدودی حل شده است [۴۸].

منابع عمیق مغناطیسی عموماً بر روی طول موج‌های بلندتر از طول موج‌های منابع مغناطیسی کم عمق پوسته تاثیر می‌گذارند. بنابراین برای تخمین عمق کف منابع مغناطیسی باید از داده‌هایی استفاده شود که وسعت زیادی را پوشش می‌دهند. داده‌های مورد استفاده در این پایان‌نامه توسط شرکت ائروسرویس تگزاس^۱ در سال‌های میان ۱۹۷۴ و ۱۹۷۷ بنا به درخواست سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران برداشت شده‌است. هدف از برداشت این داده‌ها کسب اطلاعات زمین‌شناسی ناحیه‌ای و نیز تعیین مناطق مناسب برای اکتشاف تفضیلی کانسارهای معدنی و منابع هیدروکربونی بوده است. پیمایش‌های مذکور شامل ۸۹۰۵۹ و تقریباً ۱۶۲۶۱۲ کیلومتر خط پروازی با فاصله‌ی خطوط پرواز ۷/۵ کیلومتر و فاصله خطوط کنترلی ۴۰ کیلومتر می‌باشد. با توجه به سرعت پرواز، فاصله‌ی ایستگاه‌های برداشت از یکدیگر حدود ۳/۵ کیلومتر است. هواپیمای به کار گرفته شده یک هدایت‌گر هوایی دو موتوره است که یک مغناطیس‌سنج بخار سزیم با حساسیت ثبت ۰/۰۲ گاما را حمل می‌کرده است [۴۹]. این داده‌ها از تلفیق دو سری برداشت که در سال‌های ۱۹۷۴-۱۹۷۵ و ۱۹۷۶-۱۹۷۷ انجام شده تشکیل شده‌است.

۴-۳-۲- تصحیح داده‌ها

پس از برداشت داده‌های مغناطیسی، باید تمامی عواملی که به نوعی در اطلاعات به دست آمده مشکل ایجاد می‌نمایند، شناسایی شده و حذف گردند. برای تصحیح داده‌های مغناطیسی، تمام اثرات مربوط به منشاهای غیر از پوسته زمین حذف می‌گردد، از جمله اثرات دستگاهی و اختلالات با استفاده از فیلترهای مناسب، اثر میدان مغناطیسی هسته‌ی زمین با استفاده از IGRF و تغییرات میدان خارجی زمین با استفاده از داده‌های ایستگاه مبنای زمینی از داده‌های برداشتی حذف شده و برای هم سطح‌سازی داده‌ها از خطوط کنترلی که تقریباً عمود بر خطوط اصلی پرواز است، استفاده می‌شود. در حین برداشت داده‌های هوایی به هر دلیل

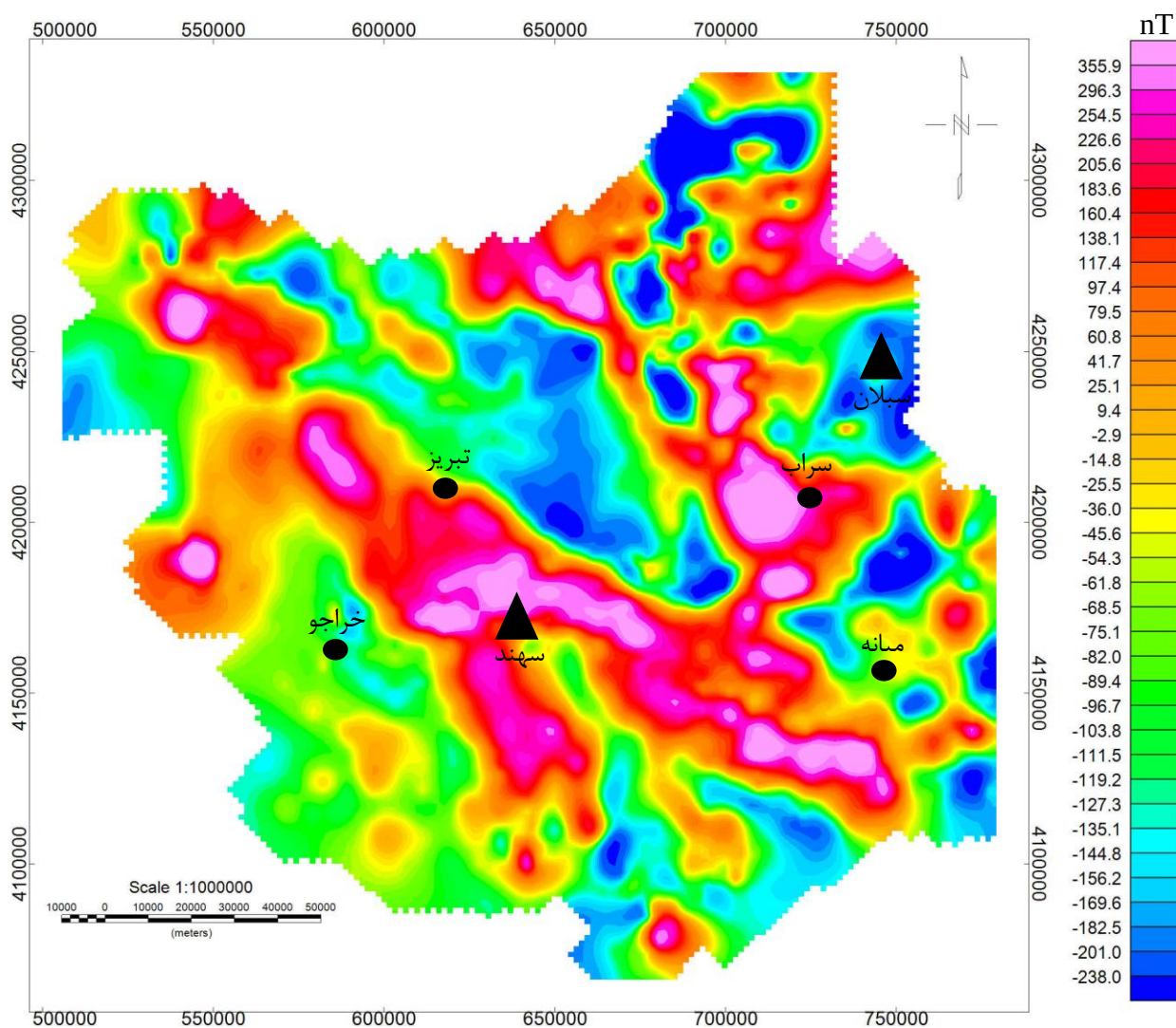
^۱ Aero Service Houston, Texas

ممکن، اگر در بخش‌هایی از پرواز در داده‌های ثبت شده ایراد و اشکال پدید آید، پس از بررسی کارشناسان مستقر در منطقه عملیاتی در صورت لزوم و طبق استانداردها، پرواز مجدد انجام می‌شود.

برای تصحیح داده‌های سامانه‌ی مکان‌یاب هواپیما و همچنین تصحیح روزانه داده‌های مغناطیسی، محلی به عنوان ایستگاه مبنا که نزدیک به محل کمپینگ و استقرار هواپیما است، انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که ایستگاه مبنای اندازه‌گیری باید در محلی دور از اشیاء مغناطیسی و یا فلزی (مانند ماشین و وسایل نقلیه) و حتی میدان‌های مغناطیسی مانند میدان ناشی از کابل‌های فشار قوی برق و ... باشد. دستگاه‌های GPS مستقر در ایستگاه مبنای قبل از شروع اولین پرواز، به مدت یک شبانه و روز با فواصل نمونه‌برداری معمولاً سه ثانیه ای داده‌های محلی را قرائت و ثبت می‌نمایند. سپس با استفاده از داده‌های سامانه مکان‌یاب جهانی ایستگاه مبنا، مختصات دقیق محل ایستگاه مبنا تعیین می‌گردد که در تصحیح و پردازش داده‌های سامانه‌ی مکان‌یابی جهانی اهمیت زیادی دارد.

داده‌های مغناطیسی که در منطقه‌ای غیر از قطب مغناطیسی برداشت می‌شوند، نمی‌توانند به طور دقیق محل منابع مغناطیسی را مشخص کنند، به طوری که منابع مغناطیسی که بی‌هنجاری مغناطیسی را ایجاد می‌کنند دقیقاً در زیر نقاط اندازه‌گیری واقع نمی‌شوند و حتی ممکن است شکل آن‌ها نیز اندکی دچار تغییر شود. برای جلوگیری از این مشکل، فیلتر برگردان به قطب مغناطیسی بر روی داده‌ها اعمال شد.

زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی کل منطقه‌ی مورد مطالعه به ترتیب ۵۶ و ۴ درجه می‌باشد که برای استفاده از فیلتر برگردان به قطب به کار رفته است. شکل (۴-۵) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل را بعد از اعمال تصحیحات نشان می‌دهد.



شکل (۴-۵) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل بعد از اعمال تصحیحات برگردان به قطب مغناطیسی و حذف اثر IGRF.

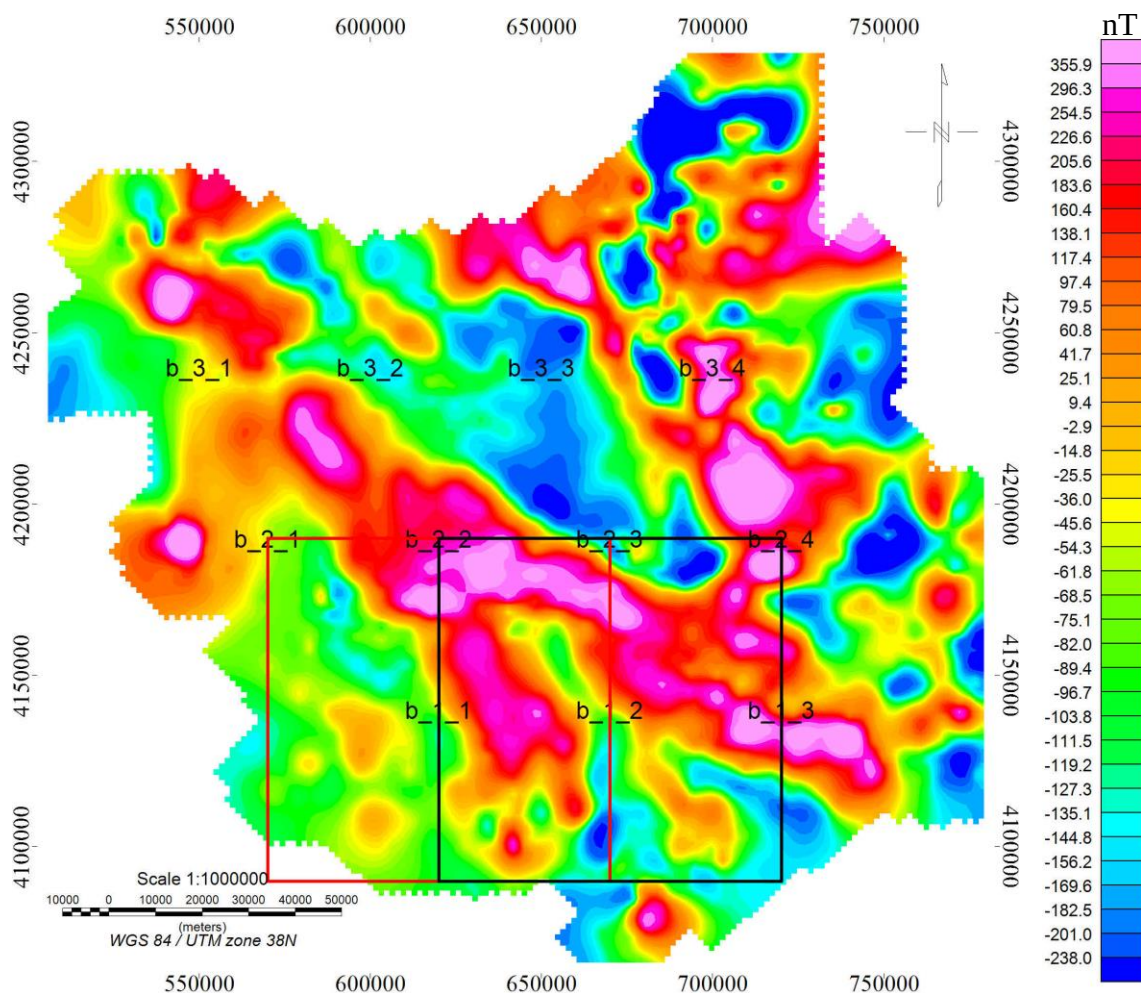
۴-۳-۲- انتخاب پنجره

یکی از مراحل تخمین عمق کف منابع مغناطیسی تقسیم‌بندی منطقه به پنجره‌های مجزا جهت تحلیل طیفی است. انتخاب اندازه‌ی بهینه پنجره از موارد بسیار مهم است. در این پایان‌نامه به منظور انتخاب ابعاد

بهینه تحقیقات زیادی مورد بررسی قرار گرفت. بلکلی (۱۹۹۵) نشان داد ابعاد پنجره باید حداقل ۵ برابر عمق مورد بررسی باشد [۱۶]. روات (۲۰۰۷) بر اساس تجربیات تحقیقات پیشین انجام شده در زمینه تخمین عمق موهو و عمق کوری که تقریباً عمق ۳۰ کیلومتر را نشان می‌دادند پیشنهاد کرد ابعاد پنجره نباید کمتر از ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر باشد که تقریباً ۱۰ برابر عمق مورد مطالعه می‌باشد [۱۱]. مائوس و همکاران (۱۹۹۷) پیشنهاد کردند که ابعاد پنجره نمی‌بایست کمتر از ۱۰۰۰ کیلومتر باشد [۳۶]. بلکلی (۱۹۸۸) منطقه‌ی نوادا را برای بررسی عمق کف منابع مغناطیسی مورد مطالعه قرار داد. در این تحقیق وی ابعاد پنجره‌ها را ۱۲۰ کیلومتر انتخاب کرد [۵۰]. سالم و همکاران (۲۰۱۴) منطقه‌ی دریای سرخ را بررسی کردند. آن‌ها با توجه به تحقیقات گذشته‌ی انجام شده در منطقه، که نشان می‌داد عمق مورد مطالعه کمتر از ۱۵ کیلومتر است ابعاد پنجره‌ها را ۱۰۰ کیلومتر در نظر گرفتند [۱۹].

کسایان و همکاران (۱۳۹۳) منطقه‌ی اطراف اردبیل را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق آن‌ها ابعاد پنجره‌ها را ۹۰ کیلومتر در نظر گرفتند و عمق کف منابع مغناطیسی را در آن منطقه بین ۱۱ تا ۲۰ کیلومتر تخمین زدند [۵۱]. خجم لی و همکاران (۱۳۹۴) منطقه‌ی اطراف اردبیل و قسمتی از آذربایجان شرقی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ابعاد پنجره‌ها را ۱۴۰ کیلومتر در نظر گرفتند و عمق منابع مغناطیسی را در آن منطقه بین ۹ تا ۱۹ کیلومتر تخمین زدند [۵۲]. خجم لی و همکاران (۲۰۱۵) بار دیگر همان منطقه را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق آن‌ها ابعاد پنجره‌ها را ۱۲۰ کیلومتر در نظر گرفتند و عمق منابع مغناطیسی را بین ۱۱ تا ۱۹ کیلومتر تخمین زدند [۵۳]. در این پایان‌نامه با توجه به مطالعات انجام شده در شرق منطقه‌ی مورد مطالعه که توسط محققین پیشین انجام شده بود ابعاد پنجره‌ها 100×100 کیلومترمربع انتخاب شد. که تقریباً بین ۵ تا ۱۰ برابر عمق مورد انتظار در مطالعه می‌باشد.

یکی دیگر از مراحل انجام این تحقیق انتخاب محل قرارگیری پنجره‌ها می‌باشد به طوری که پنجره‌ی مورد مطالعه حاوی اطلاعات کافی باشد. محدودیت موجود در داده‌ها و کمبود نقاط برداشت در برخی مناطق باعث شد که محل قرارگیری پنجره‌ها منظم نباشد و بسته به وجود داده‌ها محل قرارگیری پنجره‌ها



شکل (۴-۶) نام پنجره‌ها، نحوه‌ی پنجره‌گذاری و محل قرارگیری پنجره‌ها.

انتخاب شد. در آخر با توجه به محدودیت‌های موجود تعداد ۱۱ پنجره با همپوشانی ۵۰٪ در منطقه انتخاب شد. نام پنجره‌ها، نحوه‌ی پنجره‌گذاری و محل قرارگیری پنجره‌ها را در شکل (۴-۶) آورده شده‌است. نام پنجره‌ها و مختصات مرکز پنجره‌ها را در جدول (۴-۱) ارائه شده است.

جدول (۴-۱) نام پنجره‌ها و مختصات مرکز پنجره‌ها

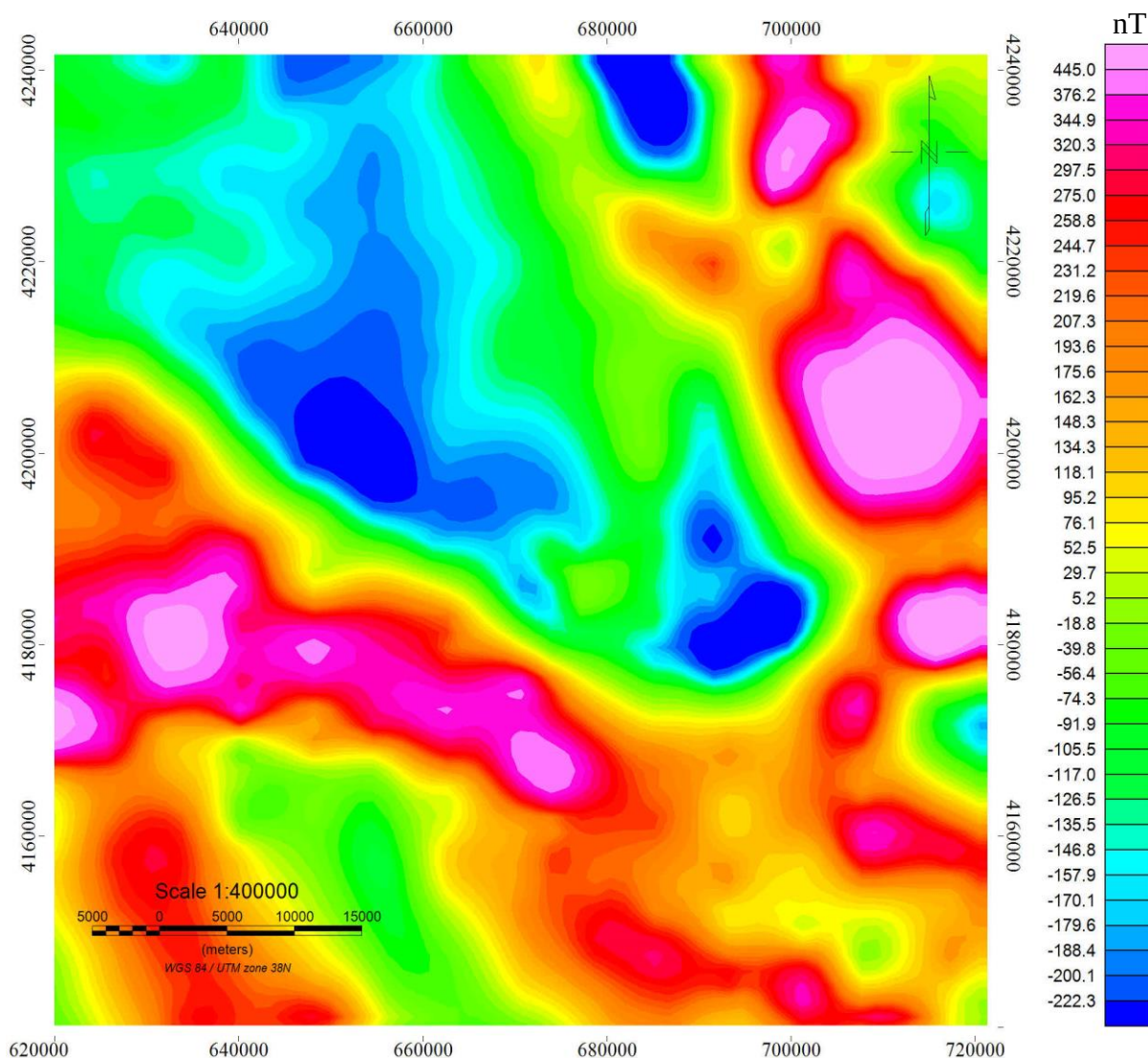
مختصات مرکز پنجره UTM		
شماره پنجره	شرقی (m)	شمالی (m)
b_۱_۱	۶۲۰۰۰۰	۴۱۴۰۰۰۰
b_۱_۲	۶۷۰۰۰۰	۴۱۴۰۰۰۰
b_۱_۳	۷۲۰۰۰۰	۴۱۴۰۰۰۰
b_۲_۱	۵۷۰۰۰۰	۴۱۹۰۰۰۰
b_۲_۲	۶۲۰۰۰۰	۴۱۹۰۰۰۰
b_۲_۳	۶۷۰۰۰۰	۴۱۹۰۰۰۰
b_۲_۴	۷۲۰۰۰۰	۴۱۹۰۰۰۰
b_۳_۱	۵۵۰۰۰۰	۴۲۴۰۰۰۰
b_۳_۲	۶۰۰۰۰۰	۴۲۴۰۰۰۰
b_۳_۳	۶۵۰۰۰۰	۴۲۴۰۰۰۰
b_۳_۴	۷۰۰۰۰۰	۴۲۴۰۰۰۰

۴-۴-طیف توان شعاعی

به منظور تخمین عمق کف پنجره‌های ایجاد شده ابتدا طیف توان شعاعی برای هر پنجره محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از روش‌های مختلف عمق بالا، متوسط و کف پوسته‌ی مغناطیسی تخمین زده می‌شود و به مرکز پنجره نسبت داده می‌شود. در ادامه روند تخمین عمق را برای پنجره $b_{۲-۳}$ آورده شده است.

۴-۴-۱- آماده سازی و پردازش پنجره

بعد از اعمال پنجره‌های مناسب ادامه‌ی کار بر روی هر پنجره به صورت جداگانه انجام خواهد شد. ابتدا نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل را برای هر پنجره محاسبه می‌کنیم. در ادامه‌ی کار روند پردازش بر روی پنجره b_{2-3} به عنوان نماینده‌ی سایر پنجره‌ها ارائه می‌شود. شکل (۷-۴) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل را برای پنجره‌ی b_{2-3} نشان می‌دهد.



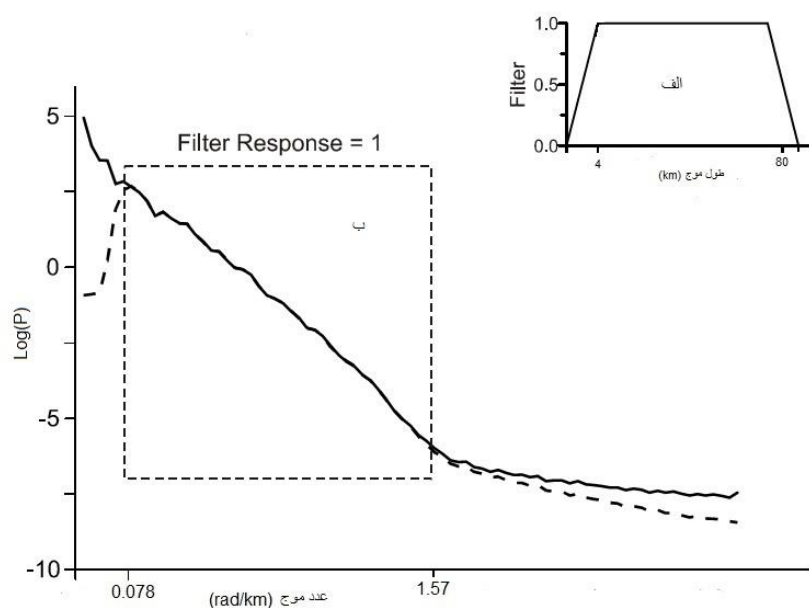
شکل (۷-۴) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل پنجره‌ی b_{2-3} قبل از اعمال هر گونه پردازش.

روند پردازش برای هر روش متفاوت است. تخمین عمق بالا و کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به بخش‌های طول موج بلند وابسته است. اما بخش‌های با طول موج بلند می‌تواند ناشی از توپوگرافی، ویژگی‌های ناحیه‌ای و میدان‌های هسته‌ای زمین باشند که باید اثر آن‌ها را حذف کرد. بخش‌هایی با طول موج کوتاه مربوط به سنگ‌های کم عمق پوسته می‌باشند، که باید اثرات ناخواسته‌ی این قبیل داده‌ها حذف شود. پیشنهادهای متنوعی در این زمینه توسط محققین زیادی مطرح شده است. تاکانا و همکاران (۱۹۹۹) از داده‌های با طول موج بلندتر از ۱۰ کیلومتر برای تخمین عمق کوری استفاده کردند [۱۴]. هیسارلی و همکاران (۲۰۱۱) از یک فیلتر میان‌گذر ۱۰ تا ۶۵ کیلومتر برای تخمین عمق نقطه‌ی کوری بهره بردند [۲۱].

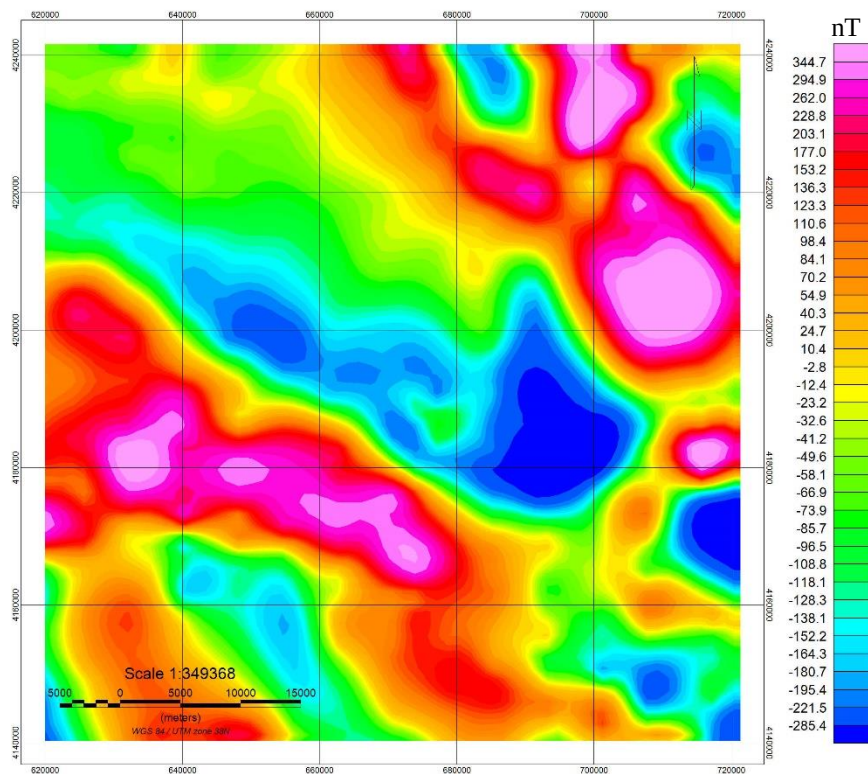
همان‌طور که اشاره شد، روند پردازش کاملاً به روش مورد استفاده بستگی دارد. برای استفاده از روش مرکزبایی به دلیل وجود گزینه‌ی انتخاب بازه‌ی عدد موج مورد استفاده می‌توان از فیلتر پایین‌گذر استفاده کرد، که طول موج‌های بسیار بلند را حذف کند. سالم و همکاران (۲۰۱۴) اعمال هرگونه پیش پردازش را غیر ضروری دانسته و اشاره کردند که اعمال پیش پردازش باعث بروز خطا در تخمین عمق می‌شود البته این پیشنهاد فقط به استفاده از روش طیف دی-فرکتال شده مربوط می‌شود [۱۹].

در این پایان‌نامه به منظور استفاده از روش مرکزبایی و مدل‌سازی پیش‌رو یک فیلتر میان‌گذر ۴ تا ۸۰ کیلومتر بر روی پنجره‌ها اعمال شد. تشریح روابط ریاضی نحوه‌ی اعمال این فیلتر خارج از حوصله است. ولی به طور خلاصه باید گفت برای اعمال فیلتر از روش تبدیل فوریه‌ی سریع^۱ استفاده شد. تمام مراحل اعمال فیلتر با نرم افزار Oasis Montaj انجام شده است. شکل (۴-۸) به صورت شماتیک نحوه‌ی اعمال فیلتر میان‌گذر و شکل (۴-۹) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل را برای پنجره‌ی ۳-۲- b بعد از اعمال فیلتر میان‌گذر نشان می‌دهد.

^۱ FFT(fast furies transform)



شکل (۴-۸) نحوه‌ی اعمال فیلتر میان‌گذر ۴ تا ۸۰ کیلومتر. فیلتر مورد استفاده (الف). طیف توان اصلی (خط ممتد) و طیف توان بعد از اعمال فیلتر (خط چین) (ب). محدوده‌ی مربع مشخص شده با خط چین پاسخ دامنه‌ی فیلتر اعمال شده می‌باشد. شکل تغییر یافته از شکل (۳) هیسارلی و همکاران (۲۰۱۲) می‌باشد [۲۱].



شکل (۴-۹) نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل پنجره‌ی ۳-۲_b بعد از اعمال فیلتر میان‌گذر.

۴-۴-۲- محاسبه‌ی طیف توان میانگین شعاعی

برای محاسبه‌ی طیف انرژی از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$\langle E(r) \rangle = \pi^2 k^2 \exp(-2\bar{h}r) \quad (1-4)$$

که در آن $\langle E(r) \rangle$ طیف انرژی،

k عدد موج،

$\bar{h}$ میانگین ضخامت،

r شعاع است.

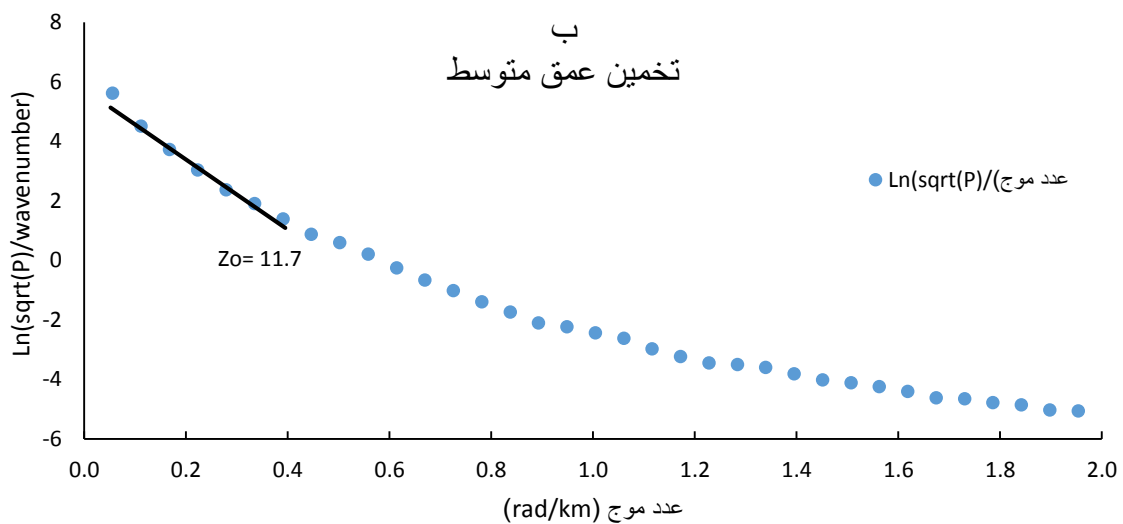
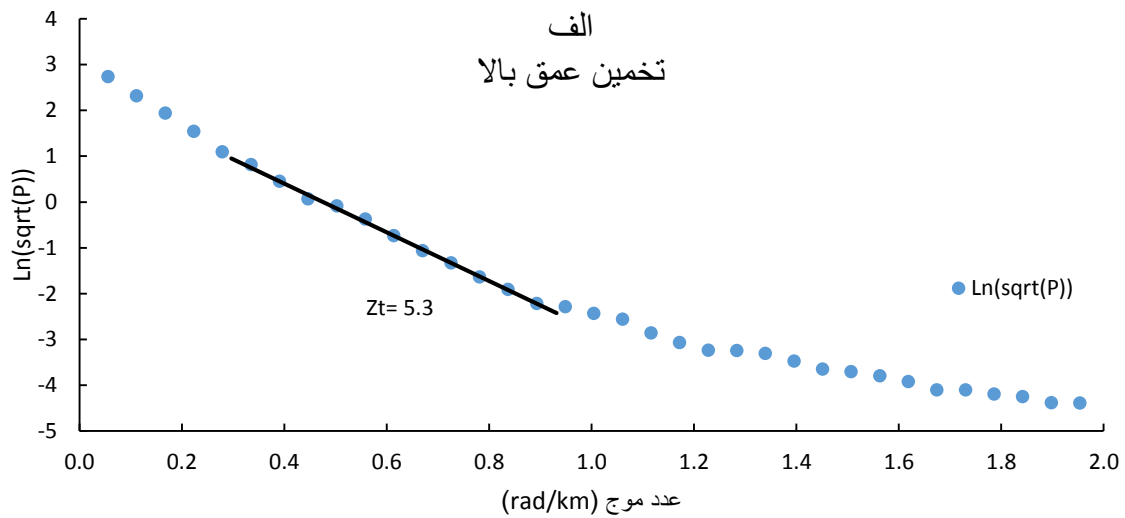
سپس برای محاسبه‌ی طیف توان میانگین شعاعی از تبدیل فوریه استفاده می‌شود به صورتی که اگر یک نقشه‌ی شدت میدان مغناطیسی کل وجود داشته باشد به ازای هر نقطه از نقشه در حوزه‌ی مکان سه پارامتر (x, y, T) وجود دارد که x, y مختصات نقطه و T شدت میدان مغناطیسی کل در آن نقطه می‌باشد. بعد از محاسبه‌ی تبدیل فوریه‌ی نقشه به ازای هر نقطه سه پارامتر (k_x, k_y, A_T) وجود خواهد داشت که k_x و k_y به ترتیب عدد موج در راستای x و y هستند و A_T دامنه فوریه می‌باشد. آنگاه یک سری شعاع که اندازه‌ی شعاع آن $r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ است، در نظر گرفته می‌شود و تمام نقاطی که هر شعاع قطع می‌کند محاسبه شده و میانگین آن‌ها محاسبه خواهد شد. در این پایان‌نامه طیف توان میانگین شعاعی با نرم افزار Oasis Montaj محاسبه شده است.

۴-۵- تخمین عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی (عمق نقطه‌ی کوری)

به منظور تخمین عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی پنجره‌های ایجاد شده، ابتدا طیف توان میانگین شعاعی برای هر پنجره محاسبه شد. سپس با استفاده از روش‌های مختلف عمق بالا، متوسط و کف پوسته‌ی مغناطیسی تخمین زده شد و به مرکز پنجره نسبت داده شد. در ادامه روند تخمین عمق برای پنجره‌ی ۳-۲- b آمده است.

۴-۵-۱- تخمین عمق به روش مرکز یابی

همان طور که در فصل سوم اشاره شد، به منظور تخمین عمق بالا طبق رابطه (۲-۸) خط راستی در بازه عدد موج مناسب به نمودار طیف توان- عدد موج پنجره‌ی مورد بررسی برازش داده شد. سپس به منظور تخمین عمق متوسط طبق رابطه (۲-۹) خط راستی به بازه‌ی عدد موج مناسب برازش داده شد. شکل (۴-۴)



شکل (۴-۱۰) نتایج تخمین عمق بالا (الف) و تخمین عمق متوسط (ب) پنجره‌ی ۳_۲_b

۱۰) الف نتیجه‌ی تخمین عمق بالا و شکل (۴-۱۰) ب نتیجه‌ی تخمین عمق متوسط را برای پنجره‌ی b_{2-3} نشان می‌دهد.

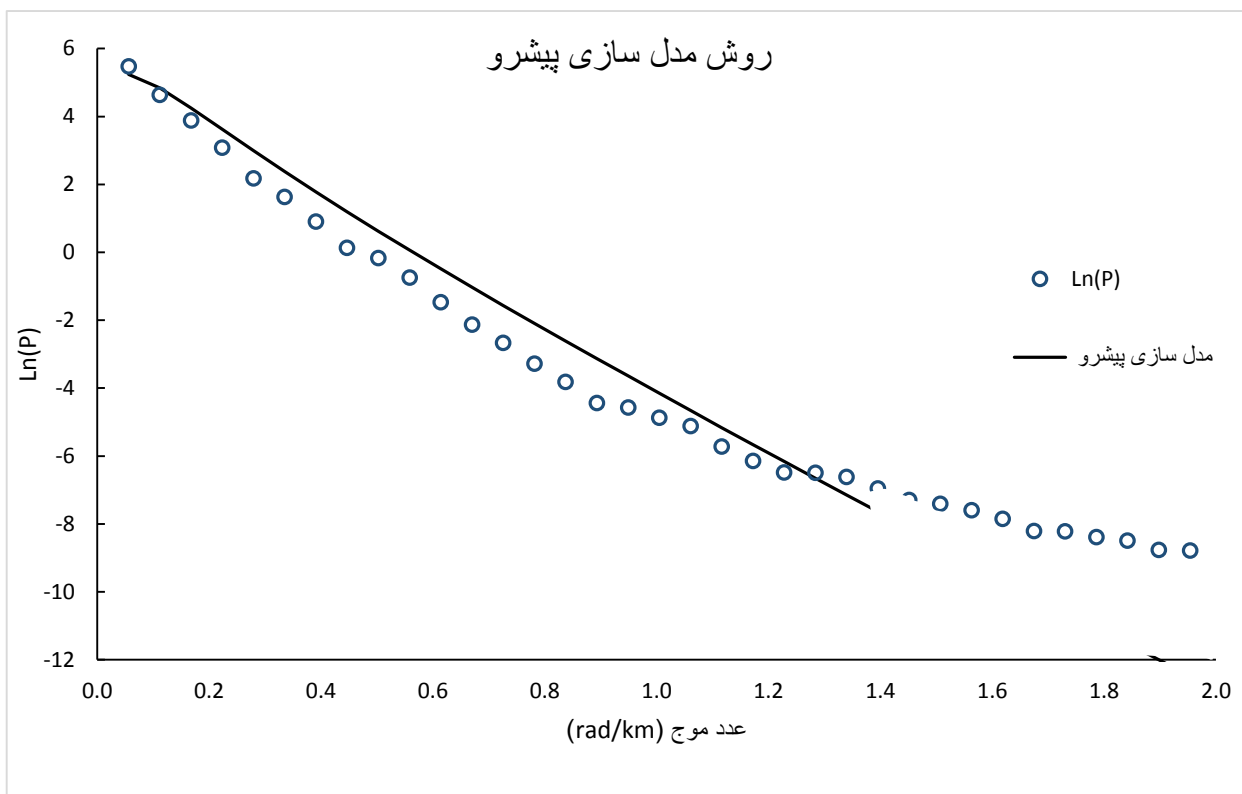
همان‌طور که مشاهده می‌شود انتخاب بازه‌ی عدد موج مناسب بسیار مشکل است و کاملاً به نظر محقق بستگی دارد. این مورد برای هر پنجره متفاوت است بنابراین تخمین عمق با خطا انجام خواهد شد. عمق کف پنجره‌ی b_{2-3} با توجه به فرمول (۲-۹) برابر $18/9$ کیلومتر تخمین زده شد. در جدول (۴-۲) نتایج مربوط به تخمین عمق بالا، متوسط و کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به روش مرکز یابی برای تمام پنجره‌ها را ارائه شده است.

جدول (۴-۲) نتایج حاصل از تخمین عمق بی‌هنجاری مغناطیسی به روش مرکز یابی

نام پنجره	عمق کف بی‌هنجاری مغناطیسی (کیلومتر)	عمق متوسط بی‌هنجاری مغناطیسی (کیلومتر)	عمق بالای بی‌هنجاری مغناطیسی (کیلومتر)
b_{1-1}	۱۸/۹۷	۱۲	۵/۰۳
b_{1-2}	۱۶/۸	۱۰/۹۲	۵/۰۴
b_{1-3}	۱۹/۴۸	۱۲/۱۴	۴/۸
b_{2-1}	۲۲/۲۲	۱۴/۱	۵/۹۸
b_{2-2}	۲۲/۶۹	۱۳/۸۷	۵/۰۵
b_{2-3}	۱۸/۱۹	۱۱/۷۵	۵/۳۱
b_{2-4}	۲۰/۳۴	۱۲/۸۹	۵/۴۴
b_{3-1}	۱۹/۵۴	۱۲/۰۹	۴/۶۴
b_{3-2}	۱۶/۴۱	۱۰/۷۹	۵/۱۷
b_{3-3}	۱۶/۶۱	۱۰/۷۹	۴/۹۷
b_{3-4}	۱۹/۹۵	۱۲/۱۵	۴/۳۵

۴-۵-۲- تخمین عمق به روش مدل سازی پیشرو

استفاده از روش مدل سازی پیشرو که توسط روات و همکاران (۲۰۰۴) ارائه شده است، روند تخمین عمق را به طور قابل توجهی ساده‌تر می‌کند، اما استفاده از این روش مشکلات خاصی هم دارد. در این تحقیق



شکل (۴-۱۱) نتایج استفاده از روش مدل سازی پیشرو برای پنجره‌ی ۳-۲- b . عمق بالا ۴ و عمق کف ۱۶/۵ کیلومتر تخمین زده شدند.

به منظور بررسی و مقایسه از این روش بهره برده‌ایم. نتایج استفاده از روش مدل‌سازی پیشرو برای پنجره‌ی ۳-۲- b در شکل (۴-۱۱) آورده شده است.

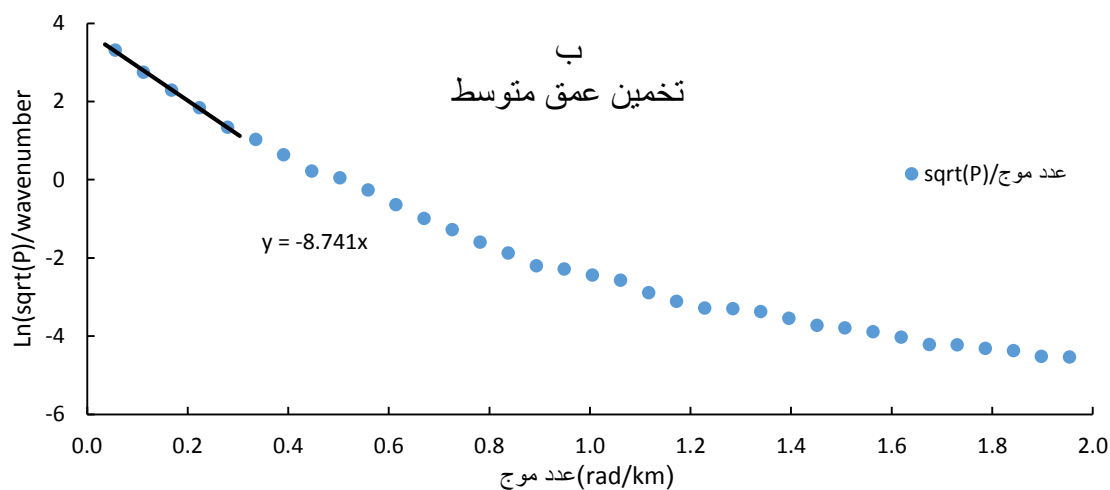
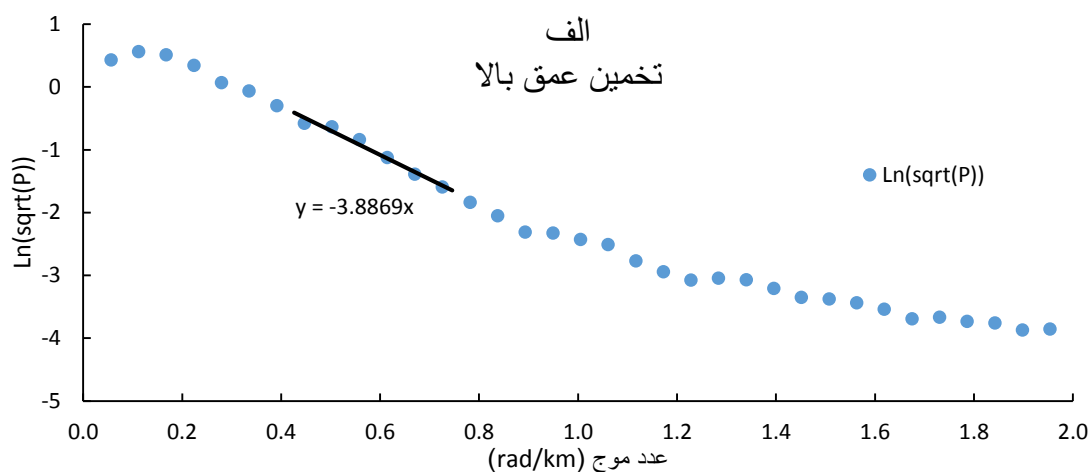
همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل برازش خوبی با طیف ندارد. عمق بالا ۴ و عمق کف ۱۶/۵ کیلومتر تخمین زده شد. در ادامه این مدل به طیف حاصل از تمامی پنجره‌ها برازش داده شد. در جدول (۳-۴) نتایج تخمین به روش مدل سازی پیشرو برای تمام پنجره‌ها ارائه شده است.

جدول (۳-۴) نتایج حاصل از تخمین عمق بی‌هنجاری مغناطیسی به روش مدل سازی پیشرو

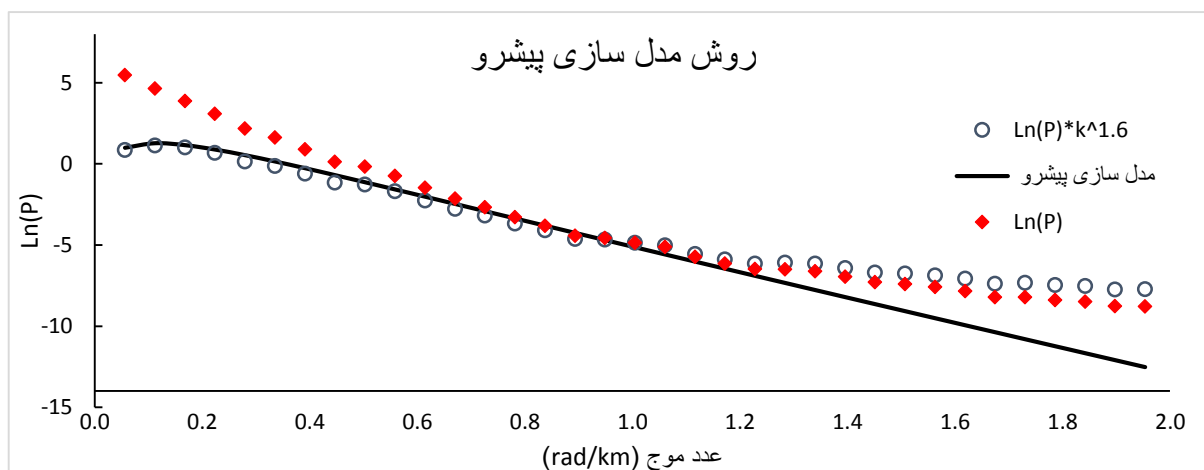
نام پنجره	عمق کف بی‌هنجاری مغناطیسی (کیلومتر)	عمق بالای بی‌هنجاری مغناطیسی (کیلومتر)
b_۱_۱	۱۶/۸	۳/۵
b_۱_۲	۱۵/۴	۳/۴
b_۱_۳	۱۷/۶	۳/۹
b_۲_۱	۱۹/۶	۳/۷
b_۲_۲	۲۲	۳/۹
b_۲_۳	۱۶/۵	۴
b_۲_۴	۱۶	۳/۸
b_۳_۱	۱۸	۴/۱
b_۳_۲	۱۵	۳/۶
b_۳_۳	۱۵/۴	۳/۲
b_۳_۴	۱۸	۳/۳

۴-۵-۳- تخمین عمق با روش طیف دی-فرکتال شده

همان‌طور که در قسمت‌های قبل اشاره شد، سالم و همکاران (۲۰۱۴) استفاده از این روش را پیشنهاد کردند. آن‌ها پیشنهاد کردند که هیچ پیش‌پردازشی روی پنجره‌ها انجام نگیرد. هدف استفاده از این روش حذف اثر فرکتالی از روی طیف توان میانگین شعاعی می‌باشد، به طوری که بعد از دی-فرکتال کردن طیف که همان حذف اثر فرکتالی می‌باشد، عمق با روش‌های مختلف تخمین زده شود. در این پایان‌نامه اثر فرکتالی با استفاده از فرمول (۲-۱۳) حذف و طبق فلوچارت (۴-۲) شاخص فرکتالی و عمق‌های بالا و کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تخمین زده شد. عمق‌ها با استفاده از دو روش مرکزبایی و مدل سازی پیشرو تخمین زده شد، که نتایج آن در جدول (۴-۴) آمده است. شکل (۴-۱۲) نتایج تخمین عمق با استفاده از طیف دی-فرکتال شده با روش مرکزبایی و شکل (۴-۱۳) نتایج تخمین عمق با استفاده از روش مدل سازی پیشرو را برای پنجره‌ی ۳-۲- b نشان می‌دهد.



شکل (۴- ۱۲) نتایج بدست آمده از تخمین عمق با استفاده از طیف دی-فرکتال شده با روش مرکز یابی. تخمین عمق بالا(الف) تخمین عمق متوسط(ب).



شکل (۴- ۱۳) نتایج بدست آمده با استفاده از طیف دی-فرکتال شده با روش مدل سازی پیشرو. لوزی‌های قرمز طیف اصلی و دایره‌های آبی طیف دی-فرکتال شده با شاخص فرکتالی ۱/۶ را نشان می‌دهد. خط سیاه مدل برازش شده پیشرو می‌باشد.

جدول (۴-۴) تخمین عمق با استفاده از طیف دی-فرکتال شده با روش‌های مرکز یابی و مدل سازی پشرو

نام پنجره	روش مدل سازی پیشرو		روش مرکز یابی		شاخص فرکتالی α	پارامتر فرکتالی ,
	عمق کف بی - بی‌هنجاری مغناطیسی (کیلومتر)	عمق کف بی - بی‌هنجاری مغناطیسی (کیلومتر)	عمق کف بی - بی‌هنجاری مغناطیسی (کیلومتر)	عمق کف بی - بی‌هنجاری مغناطیسی (کیلومتر)		
b_۱_۱	۱۳/۴	۳/۵	۱۵/۱	۳/۴۹	۱/۵	۲/۵
b_۱_۲	۱۲/۱	۳/۸	۱۲/۷۷	۴/۴۳	۱/۱	۲/۱
b_۱_۳	۱۳/۲	۲/۸	۱۱/۵۳	۳/۴۷	۱/۶	۲/۶
b_۲_۱	۱۳/۲	۴/۱	۱۵/۳۱	۴/۱۹	۱/۸	۲/۸
b_۲_۲	۱۱/۲	۳/۵	۱۵/۰۸	۳/۶	۱/۵	۲/۵
b_۲_۳	۹/۸	۳/۷	۱۳/۶	۳/۸۸	۱/۶	۲/۶
b_۲_۴	۱۰/۲	۳/۴	۱۲/۶۸	۳/۹	۱/۵	۲/۵
b_۳_۱	۱۶/۸	۳/۴	۱۵/۲۴	۳/۸	۱/۲	۲/۲
b_۳_۲	۱۵/۶	۳/۵	۱۶/۵۱	۴/۱۵	۱/۶	۲/۶
b_۳_۳	۱۴/۶	۲/۵	۱۰/۳۲	۳/۲	۲	۳
b_۳_۴	۱۵/۴	۳/۲	۱۳/۹۴	۲/۶	۱/۷	۲/۷

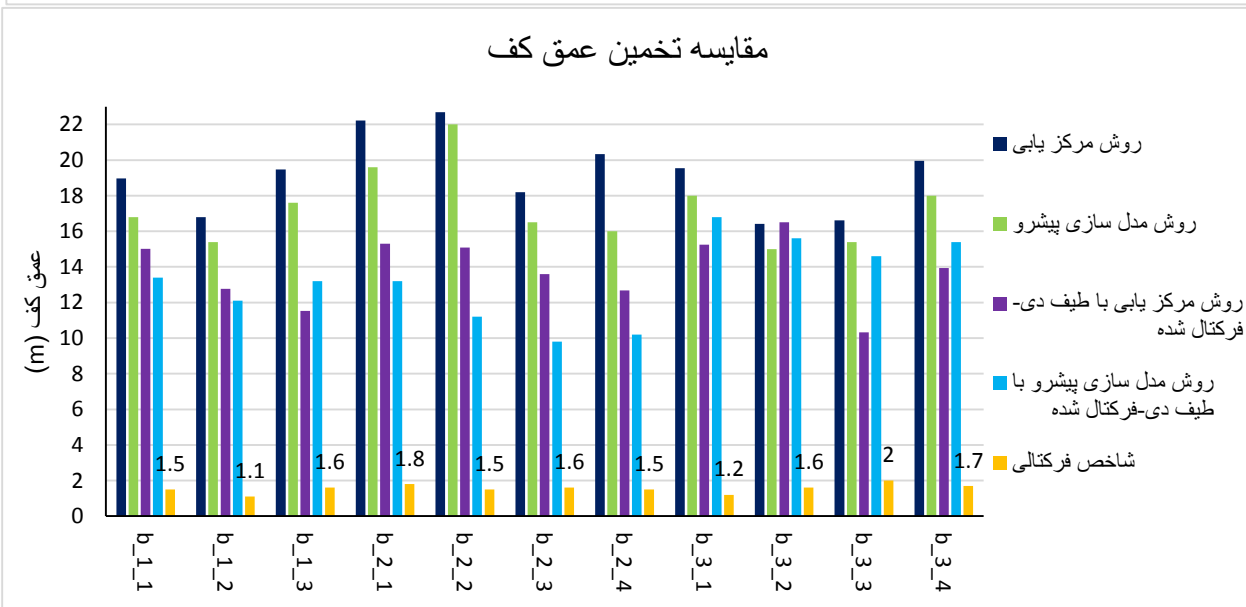
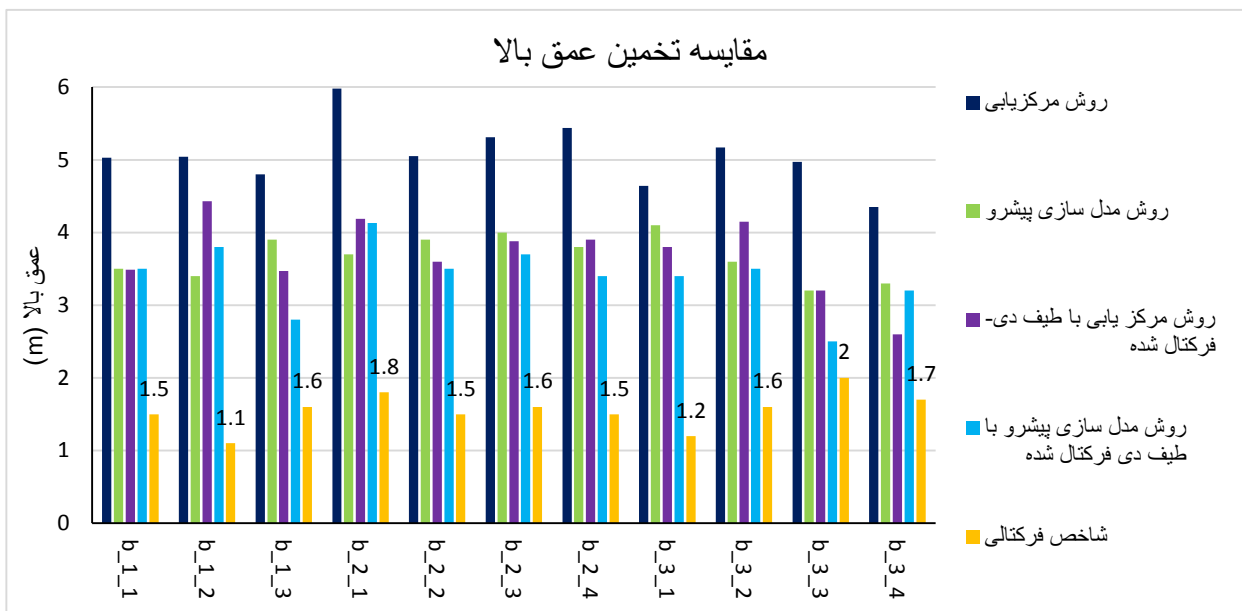
۴-۶- نتیجه‌گیری

در مورد مزیت‌ها و ضعف‌های روش‌های مختلف بحث‌های زیادی وجود دارد که در این تحقیق نیز به برخی از آنها پرداخته شد. حذف نکردن اثر فرکتالی از طیف توان شعاعی خود مشکلاتی را برای تخمین عمق به وجود می‌آورد اما حذف کردن اثر آن نیز به طبع مشکلاتی دارد. هنوز روش خاصی برای بدست آوردن مستقیم پارامتر فرکتالی ارائه نشده است. استفاده از روش طیف دی-فرکتال شده بهترین راه حل برای بدست آوردن پارامتر فرکتالی است، که تا کنون ارائه شده. پارامترهای فرکتالی در این تحقیق با استفاده

از روش طیف دی-فرکتال شده بین ۲/۱ تا ۳ به دست آمده است. شکل (۴-۱۴) مقایسه تخمین عمق بالا و کف با استفاده از تمامی روش‌های استفاده را شده نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده، عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی که با روش مرکز یابی به دست آمده‌اند اختلاف نسبتاً زیادی با نتایج حاصل از سایر روش‌ها دارد. که دلیل عمده‌ی آن اعمال پیش پردازش روی پنجره‌ها است. دلیل دیگر این اتفاق، انتخاب بازه‌ی عدد موج مناسب می‌باشد که بسیار دشوار است. ولی در سایر روش‌ها نتایج تقریباً مشابه است. با مقایسه نتایج قبل و بعد از حذف اثر فرکتالی مقادیر تخمین زده شده‌ی عمق بالا با استفاده از روش‌های مختلف اختلاف چندانی ندارند و حذف اثر فراکتالی بیشتر روی تخمین عمق کف اثر می‌گذارد.

در مورد تخمین عمق کف بی‌هنجاری مغناطیسی که یکی از اهداف این پایان‌نامه می‌باشد، بحث‌های زیادی وجود دارد که به برخی از آن‌ها در متن اشاره شد. در انتها نتایج بدست آمده از روش مدل سازی پیشرو با طیف دی-فرکتال شده به عنوان عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی یا عمق کوری در منطقه مورد مطالعه انتخاب شد.



شکل (۴-۱۴) شکل بالا مقایسه نتایج بدست آمده از تخمین عمق بالا و شکل پایین نتایج بدست آمده از تخمین عمق کف بی-هنجاری‌های مغناطیسی. شاخص‌های فرکتالی بدست آمده برای هر پنجره در هر دو شکل آمده است.

فصل پنجم:

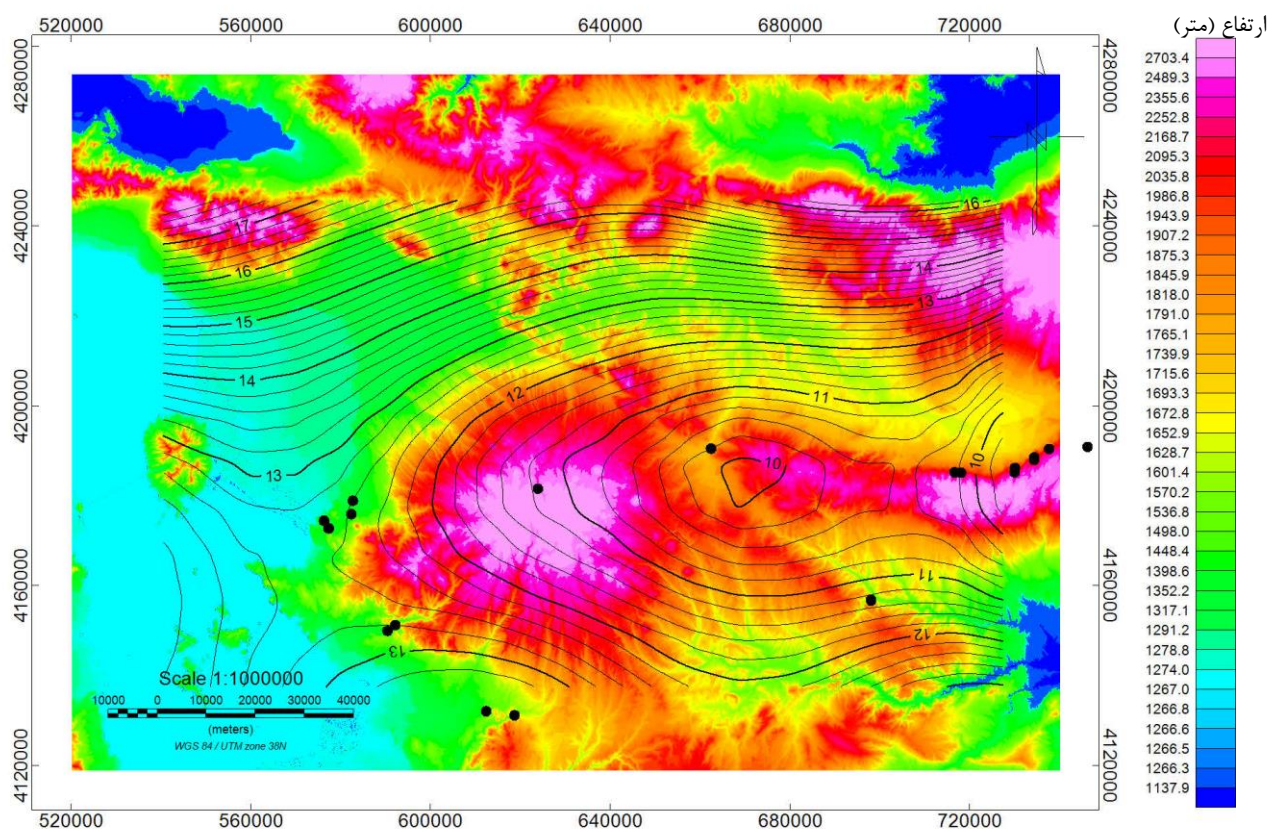
تهیه نقشه‌های عمق کوری، گرادیان حرارتی و جریان
حرارتی شمال غرب ایران

۵-۱- مقدمه

همان‌طور که در فصل یک اشاره شد در اثر درجه حرارت خاصی (نقطه کوری) مواد فرومغناطیس بخشی یا تمام خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند. بنابراین با در نظر گرفتن عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به عنوان عمق نقطه‌ی کوری و با ترسیم خطوط کنتوری عمق نقطه‌ی کوری می‌توان به محاسبه گرادیان و جریان حرارتی در منطقه پرداخت. تهیه‌ی نقشه‌ی گرادیان و جریان حرارتی می‌توان به توزیع دمایی در عمق پی برد. به همین دلیل محاسبه عمق کوری با روش‌های با دقت بالاتر برای شناسایی مناطق مستعد زمین‌گرمایی بسیار حائز اهمیت است. در این فصل نقشه‌ی کنتوری عمق نقطه‌ی کوری، گرادیان حرارتی و جریان حرارتی شمال غرب ایران با استفاده از نتایج حاصل از روش مدل سازی پیشرو با طیف دی-فرکتال شده تهیه خواهد شد. بحث و بررسی‌های لازم بر روی این نقشه‌ها انجام خواهد شد و به کمک شواهد و اطلاعات موجود اعتبار سنجی‌های لازم صورت می‌گیرد.

۵-۲- تهیه نقشه‌ی عمق نقطه‌ی کوری

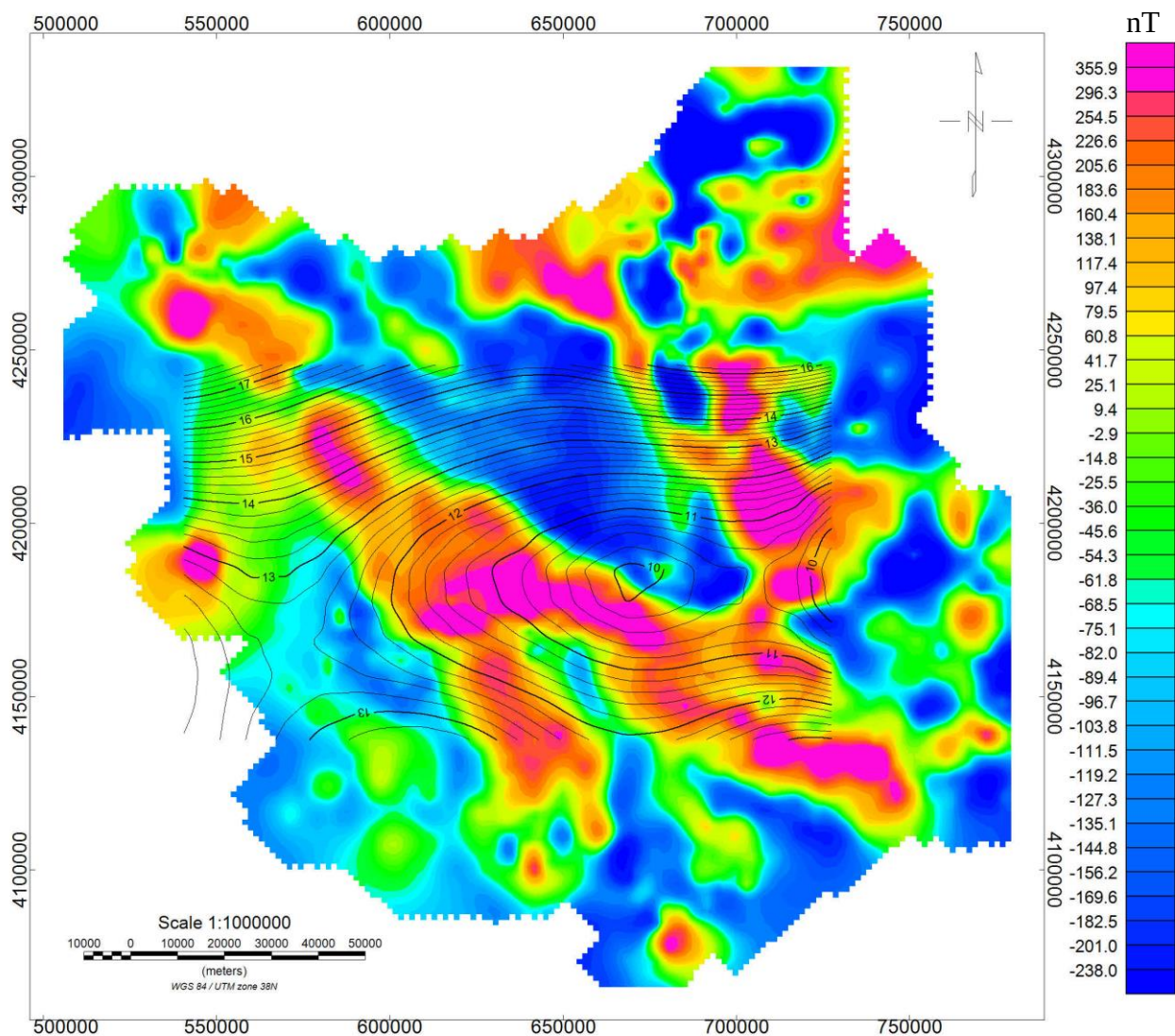
با توجه به نتایج به دست آمده در فصل چهارم در مورد تخمین عمق بالا و کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و همین‌طور مباحث ارائه شده در فصل اول و دوم می‌توان عمق کف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را با عمق نقطه‌ی کوری مرتبط دانست. با توجه به این اطلاعات نقشه کنتوری عمق نقطه‌ی کوری تخمین زده شده با روش مدل سازی پیشرو با طیف دی-فرکتال شده بر روی نقشه مغناطیسی برگردان به قطب شده و نقشه توپوگرافی منطقه تهیه شد. با توجه به شکل (۵-۱) و (۵-۲) می‌توان گفت که عمق نقطه‌ی کوری در بخش‌های اطراف قله‌ی سهند کم‌ترین مقدار را نشان می‌دهد. همین‌طور این مقدار در قسمت جنوب غرب منطقه‌ی مورد مطالعه روند کاهشی به خود می‌گیرد.



شکل (۵-۱) نقشه‌ی تغییرات خطوط کنتوری عمق نقطه‌ی کوری بر روی نقشه‌ی توپوگرافی شمال غرب ایران تهیه شده از مدل رقومی ارتفاع ۹۰ متر سازمان زمین‌شناسی کشور. قله‌ی سه‌پند در مرکز نقشه و قله‌ی سیلان در قسمت شمال شرق نقشه مشاهده می‌شود. (فاصله‌ی خطوط کنتوری ۰/۲ کیلومتر می‌باشد) (نقاط سیاه رنگ محل چشمه‌های آب گرم را نشان می‌دهد).

از نکات قابل بحث در مورد شکل‌های (۵-۱) و (۵-۲) محدوده‌ی مورد مطالعه است. در شکل (۴-۴) نحوه‌ی پنجره گذاری ارائه شد اما نکته‌ی قابل بحث این است که عمق نقطه‌ی کوری به مرکز پنجره نسبت داده می‌شود به همین دلیل محدوده‌ی نقشه‌ی کنتوری از هر سمت تقریباً ۵۰ کیلومتر کوچک‌تر از منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد. مورد دیگر این است که ارتباط خوبی بین مقادیر پایین مغناطیدگی با عمق نقطه‌ی کوری مشاهده می‌شود. به همین دلیل از نقشه‌ی مغناطیسی با ترکیب رنگی خاصی استفاده شده است که آنومالی‌های منفی در آن قابل مشاهده‌تر است. زیرا در روش مغناطیس‌سنجی هوابرد، فراوان‌ترین کانی مغناطیسی در سنگ‌های آذرین یعنی مگنتیت مورد بررسی قرار می‌گیرد. براساس

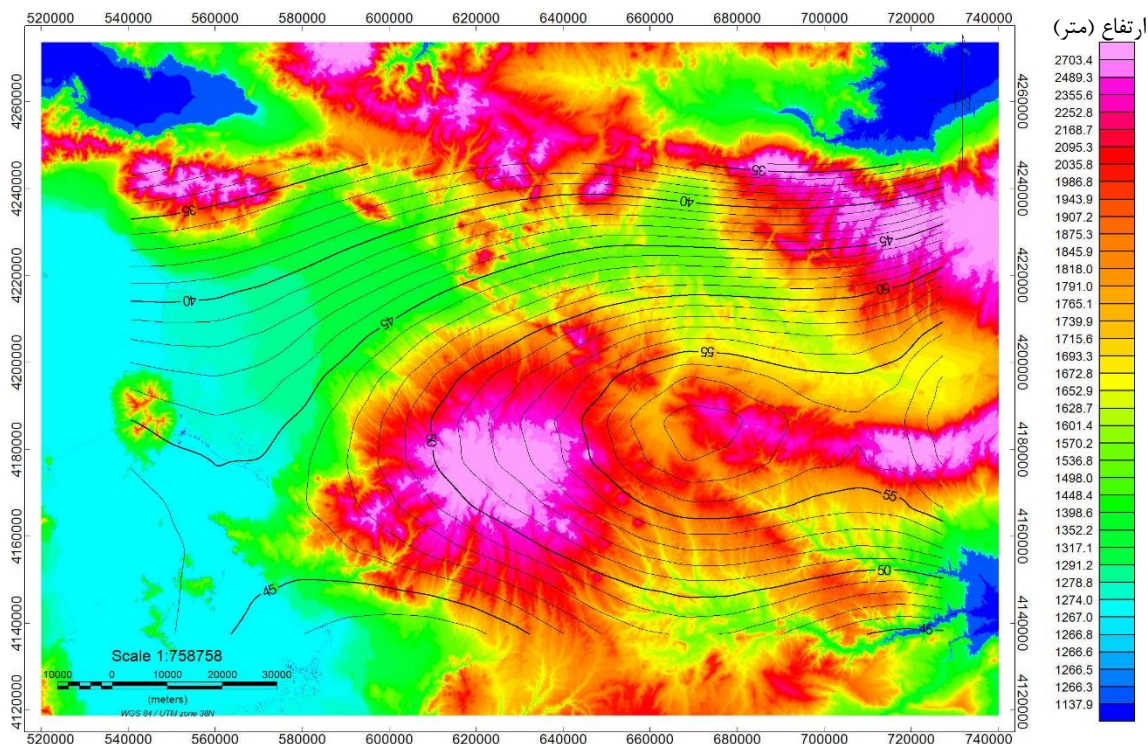
وابستگی به منابع انرژی زمین گرمایی، دو عامل حرارت و دگرسانی گرمایی سبب کاهش میزان مغناطیدگی یا حذف کامل آن در این کانی می شود. به این ترتیب هر جا که آنومالی مغناطیسی منفی در سنگ هایی که به طور طبیعی دارای خاصیت مغناطیسی بالا هستند مشاهده گردد، به احتمال زیاد در آن منطقه، منبع یا منابع زمین گرمایی وجود دارد. البته در هنگام تفسیر داده ها باید این نکته را مد نظر قرار داد که عوامل دیگری نیز ممکن است سبب کاهش خاصیت مغناطیسی سنگ ها شوند.



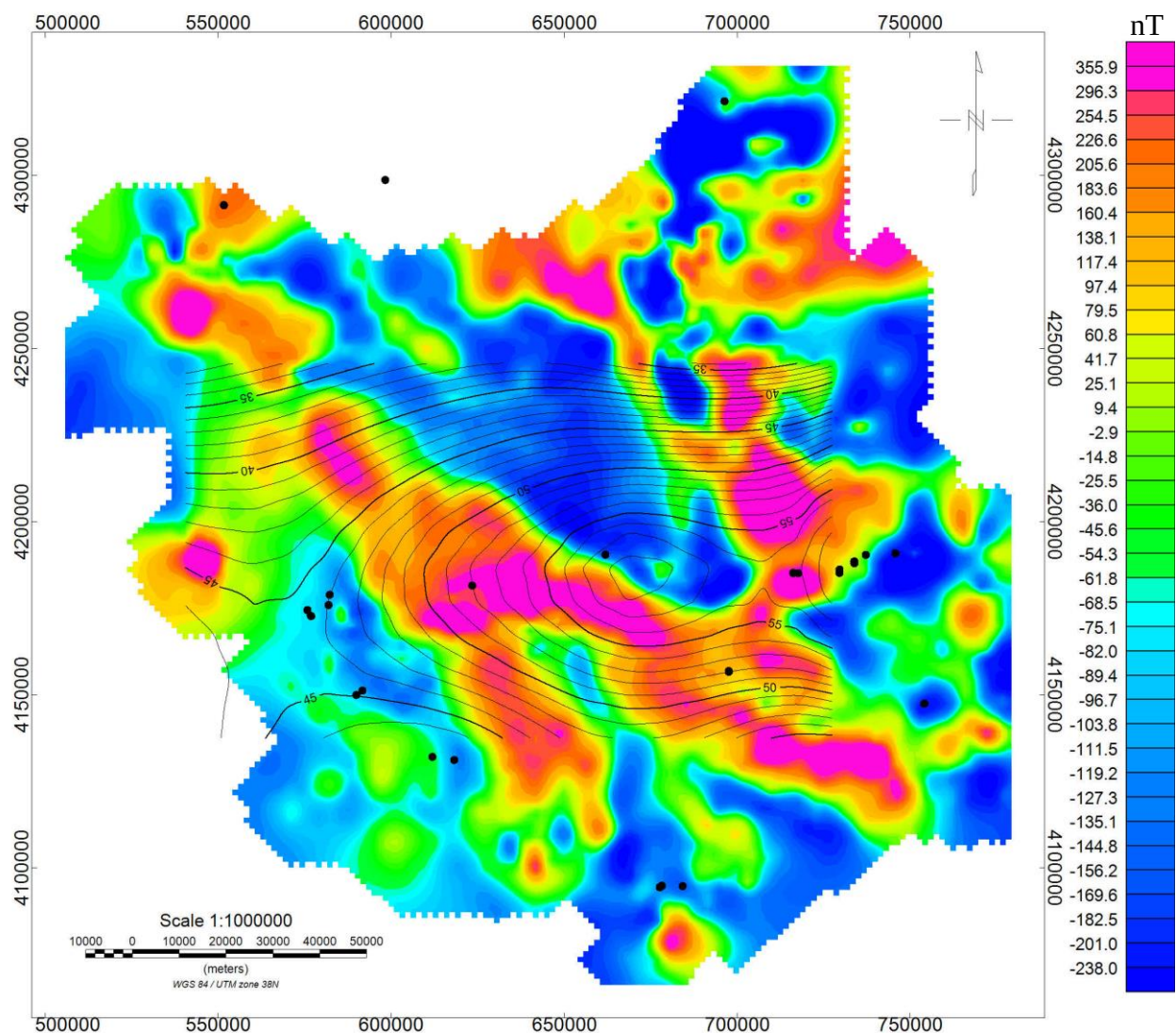
شکل (۵-۲) نقشه‌ی کنتوری تغییرات عمق نقطه‌ی کوری بر روی نقشه‌ی مغناطیسی برگردان به قطب شده در شمال غرب ایران با روش مدل سازی پیشرو با طیف دی-فرکتال شده (فاصله خطوط کنتوری ۰/۲ کیلومتر می باشد)

۵-۳- تهیه نقشه‌ی گرادیان حرارتی

یکی از روش‌های تخمین گرادیان حرارتی پوسته، تعیین عمق نقطه‌ی کوری می‌باشد. دمای کوری با توجه به کانی‌شناسی و فشار تغییر می‌کند و بازه‌ی تغییرات آن ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. در پوسته‌ی قاره‌ای دمای کوری را ۵۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در نظر می‌گیرند [۱۲]. مقادیر گرادیان حرارتی منطقه‌ی مورد مطالعه با لحاظ دمای کوری ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد و در شکل‌های (۳-۵) و (۴-۵) به نمایش در آمده است.



شکل (۳-۵) نقشه‌ی تغییرات خطوط کنتوری گرادیان حرارتی بر روی نقشه‌ی توپوگرافی شمال‌غرب ایران تهیه شده از مدل رقومی ارتفاع ۹۰ متر سازمان زمین‌شناسی کشور. قله‌ی سه‌پند در مرکز نقشه و قله‌ی سبلان در قسمت شمال-شرق نقشه مشاهده می‌شود. (فاصله خطوط کنتوری $1^{\circ}\text{C}/\text{km}$ می‌باشد).



شکل (۴-۵) نقشه‌ی تغییرات گرادیان حرارتی بر روی نقشه‌ی مغناطیسی برگردان به قطب شده در شمال غرب ایران (فاصله خطوط کنتوری $1^{\circ}\text{C}/\text{km}$ می‌باشد) (نقاط سیاه رنگ چشمه‌های آبگرم منطقه را نشان می‌دهد).

۴-۵- تهیه نقشه‌ی جریان حرارتی

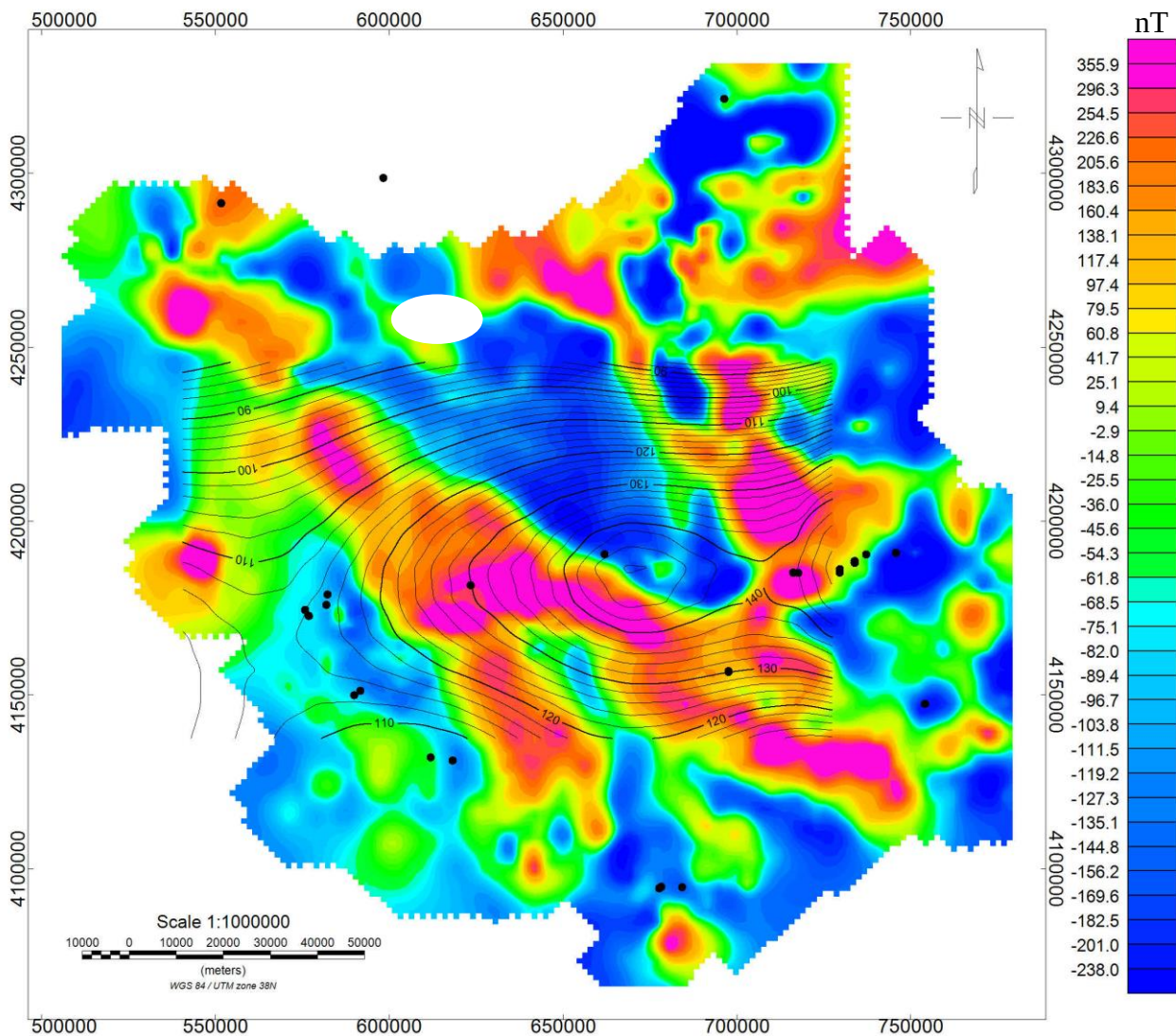
برای محاسبه‌ی مقادیر جریان حرارتی از داده‌های عمق کوری استفاده شد. جریان حرارتی را می‌توان با در اختیار داشتن گرادیان حرارتی و ضریب هدایت حرارتی با استفاده از رابطه‌ی (۲-۱۴) محاسبه نمود. ضریب

هدایت حرارتی برای سنگ‌های پوسته به طور میانگین $2/5 \text{ W/m}^2\text{C}$ در نظر گرفته می‌شود [۵۴]. شکل

(۵-۵) و (۶-۵) نقشه‌ی جریان حرارتی شمال غرب ایران را نشان می‌دهد.

کمترین و بیشترین مقدار جریان حرارتی به ترتیب 80 mW/m^2 در شمال غرب منطقه و 142 mW/m^2

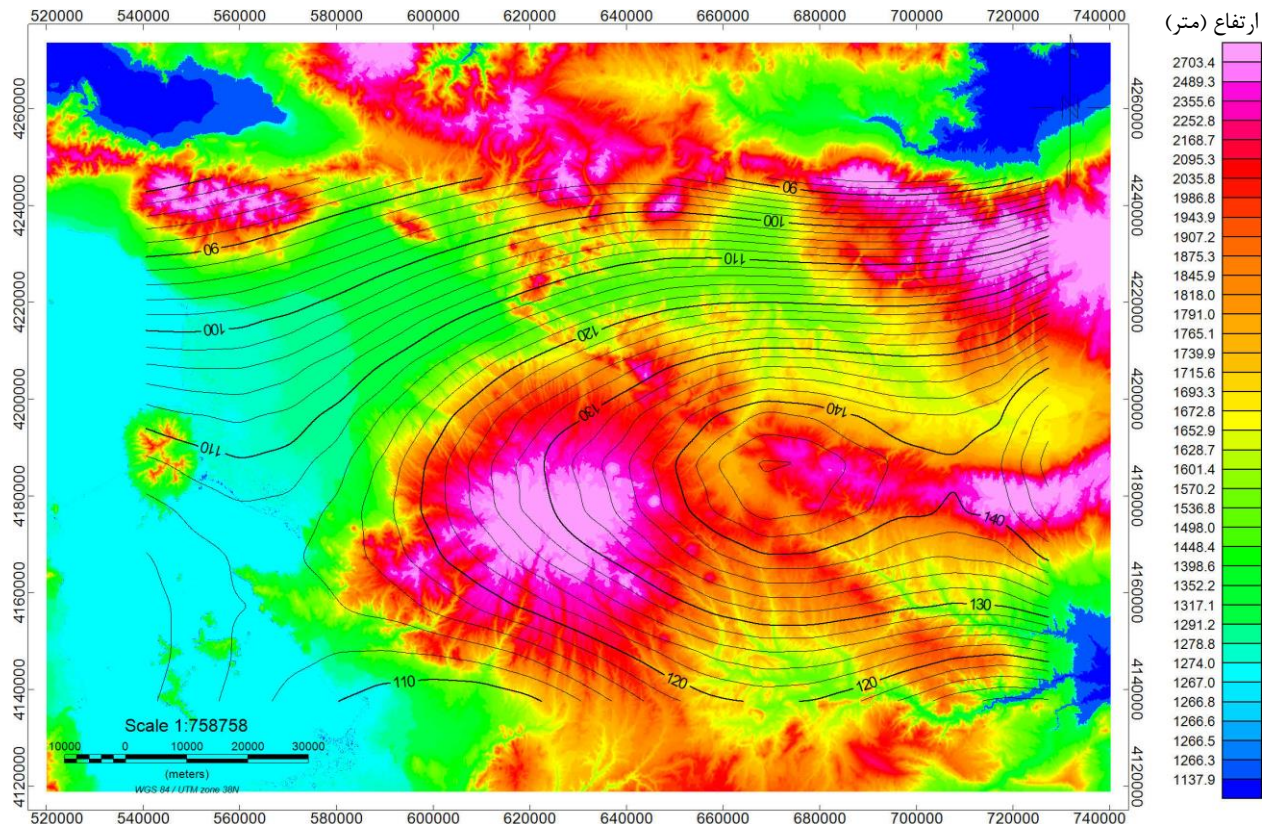
در شرق و مرکز منطقه‌ی مورد مطالعه اتفاق افتاده است. متوسط جریان حرارتی در مناطق قاره‌ای که



شکل (۵-۵) نقشه‌ی تغییرات جریان حرارتی بر روی نقشه‌ی مغناطیسی برگردان به قطب شده در شمال غرب ایران (فاصله خطوط کنتوری 2 mW/m^2 می‌باشد)

حرارت طبیعی دارند $60 \text{ mW} / \text{m}^2$ می باشد. مقادیر بیش از $100-130 \text{ mW} / \text{m}^2$ بیان گر احتمال وجود

منابع زمین گرمایی در منطقه است [۵۵][۵۶].



شکل (۵-۶) نقشه‌ی تغییرات خطوط تراز جریان حرارتی بر روی نقشه‌ی توپوگرافی شمال غرب ایران تهیه شده از مدل رقومی ارتفاع ۹۰ متر سازمان زمین شناسی کشور. قله‌ی سهند در مرکز نقشه و قله‌ی سبلان در قسمت شمال شرق نقشه مشاهده می شود (فاصله خطوط کنئوری $2 \text{ mW} / \text{m}^2$ می باشد).

۵-۵- نتیجه گیری

با توجه به اطلاعات به دست آمده از نقشه‌ی جریان حرارتی باید گفت که تمام منطقه‌ی مورد مطالعه دارای پتانسیل بسیار بالایی جهت انجام کارهای اکتشافی بعدی می باشد. محدوده‌ی شرق قله‌ی سهند و جنوب غرب قله‌ی سبلان به عنوان مناطق پیشنهادی جهت انجام اکتشافات بیشتر معرفی می شود. با توجه به روش مورد استفاده در این تحقیق باید گفت که از نتایج بدست آمده می توان به عنوان یک لایه‌ی اکتشافی در مراحل بعدی اکتشاف استفاده کرد.

۵-۶- اعتبار سنجی

در این فصل از پایان‌نامه نقشه‌های عمق نقطه‌ی کوری، گرادیان حرارتی و جریان حرارتی را که با روش مدل‌سازی پیشرو با طیف دی-فرکتال شده به دست آمده بود تهیه و ارائه شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده مقادیر عمق نقطه‌ی کوری در اطراف قله‌ی آتشفشانی سهند کم‌ترین مقدار را نشان می‌دهد و بیشترین مقدار گرادیان حرارتی و جریان حرارتی نیز در این بخش از منطقه دیده می‌شود. به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از تمامی اطلاعات موجود و مطالعات گذشته در منطقه استفاده خواهد شد. چشمه‌های آب گرم از جمله شواهد سطحی هستند که وجود یک منبع زمین‌گرمایی زیر سطحی را تأیید می‌نمایند. با توجه به شکل (۵-۷) چشمه‌های آب گرم متعددی با گستره‌ی دمایی ۴۵ تا ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در نواحی مشخص شده وجود دارد، که بیان‌گر بالا بودن فعالیت دمایی در عمق می‌باشند. آتشفشان سهند با گسترش جانبی وسیع خود که عمدتاً از جنس گدازه‌های ریولیتی، داسیتی و آندزیتی می‌باشد و با وجود خاکستر با قطعات پامیس در فواصل بسیار دور از قله نشان می‌دهد که فوران‌های انفجاری بسیار شدید در این قله رخ داده است. که خود بالا بودن مقادیر بالای جریان حرارتی را در اطراف قله توجیه می‌کند [۴۴].

فصل ششم :
نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- مقدمه

با توجه به اهمیت تخمین عمق کوری در مرحله‌ی اکتشاف مقدماتی منابع زمین‌گرمایی و مشکلات موجود در روش‌های مختلف تخمین عمق نقطه کوری، در این پایان‌نامه سعی بر این بود که با بهترین روش موجود مناطق مستعد زمین‌گرمایی شمال غرب ایران شناسایی شود. اهم نتایج به‌دست آمده در این پایان‌نامه در ادامه آورده خواهد شد و سپس پیشنهاداتی نیز جهت تکمیل و بهبود کار ارائه خواهد شد.

۶-۲- نتیجه‌گیری

در این بخش چکیده‌ای از نتایج حاصل از پایان‌نامه ارائه می‌گردد.

* با بکارگیری روش مدل سازی پیشرو با استفاده از طیف دی-فرکتال شده پارامتر فرکتالی بین $2/1$ تا 3 تخمین زده شد.

* با استفاده از روش مدل سازی پیشرو با استفاده از طیف دی-فرکتال شده عمق بالای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی بین $2/5$ تا $3/8$ کیلومتر تخمین زده شد.

* با استفاده از روش مدل سازی پیشرو با استفاده از طیف دی-فرکتال شده عمق کوری بین $9/8$ تا $16/8$ کیلومتر تخمین زده شد.

* کمترین و بیشترین مقدار جریان حرارتی به ترتیب $80 \text{ mW} / \text{m}^2$ در شمال غرب منطقه و $142 \text{ mW} / \text{m}^2$ در شرق و مرکز منطقه‌ی مورد مطالعه اتفاق افتاده است.

* استفاده از روش مرکز یابی به منظور تخمین عمق کوری به دلیل مشکل بودن انتخاب بازه‌ی عدد موج مناسب روش مطمئنی نیست.

* استفاده از روش مدل سازی پیشرو با استفاده از طیف دی-فرکتال شده ده روشی مطمئن‌تر از روش‌های ارائه شده قبلی است.

* با توجه به نتایج بدست آمده تمام منطقه مورد مطالعه دارای پتانسل جهت اکتشافات بیشتر می‌باشد.

۶-۳-پیشنهادات

* در این پایان نامه محدوده‌ی داده‌های مغناطیسی محدود بود اما برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود قسمت غرب و جنوب غرب منطقه مطالعه شود.

* استفاده از روش‌های وارون سازی جهت تخمین همزمان عمق بالا، عمق کف و پارامتر فرکتالی توصیه می‌شود.

* استفاده از پنجره‌های متحرک جهت پوشش دادن کل منطقه‌ی مورد مطالعه.

* استفاده از لایه‌های مختلف اکتشافی و استفاده از نتایج به دست آمده در این پایان نامه به عنوان یک لایه‌ی اکتشافی قویاً توصیه می‌شود.

منابع

- [۱] تحلیل داده‌های میدان پتانسیل در منطقه‌ی اردبیل و آذربایجان شرقی، سازمان انرژی‌های نو، (۱۳۹۲).
- [۲] Dickson, M. H. and Fanelli, M., (۱۹۹۵), "*Geothermal energy*", vol. ۱, John Wiley & Sons Inc, New York.
- [۳] Kasidi, S. and Nur, A., (۲۰۱۳), "Estimation of Curie Point Depth, Heat Flow and Geothermal Gradient Infered from Aeromagnetic Data over Jalingo and Environs North – Eastern Nigeria", *Int. J Sci. Emerging Tech*, ۶, ۶.
- [۴] Bansal, A. R., Anand, S. P., Rajaram, Mita., Rao, V. K. and Dimri, V. P., (۲۰۱۳), "Depth to the bottom of magnetic sources (DBMS) from aeromagnetic data of central India using modified centroid method for fractal distribution of sources", *Tectonophysics*. ۶۰۳, pp ۱۵۵-۱۶۱.
- [۵] Okubo, Y. and Matsunaga, T., (۱۹۹۴), "Curie point depth in northeast Japan and its correlation with regional thermal structure and seismicity" *J. Geophys. Res.*, ۹۹, ۱۱, pp ۲۲۳۶۳-۲۲۳۷۱.
- [۶] Gupta, H. and Roy, S., (۲۰۰۷), "Geothermal Energy: An Alternative Resource for the ۲۱ST Century", *Elsevier*, pp ۱۱۱.
- [۷] Aydin, I. and Oksum, E., (۲۰۱۰), "Exponential approach to estimate the Curie-temperature depth" *J. Geophys. Eng.* ۷, pp ۱۱۳-۱۲۵.
- [۸] Spector, A. and Grant, F. S., (۱۹۷۰), "Statistical Models for Interpreting Aeromagnetic Data" *Geophysics*. ۳۵, pp ۲۹۳-۳۰۲.
- [۹] Bhattacharyya, B. K. and Leu, L. K., (۱۹۷۵), "Spectral Analysis of Gravity and

Magnetic Anomalies due to Two-dimensional Structures" *Geophysics*. 40, pp 993-1013.

[10] Bouligand, C., Jonathan, M., Glen, G. and Blakely, J. R., (2009), "Mapping Curie temperature depth in the western United States with a fractal model for crustal magnetization", *J. Geophys. Res.* 114, pp 1-25.

[11] Ravat, D., Pignatelli, A., Nicolosi, I. and Chiappini, M., (2007), "A study of spectral methods of estimating the depth to the bottom of magnetic sources from near-surface magnetic anomaly data" *Geophys. J. Int.* 169, pp 421-434.

[12] Ross, H. E., Blakely, R. J. and Zoback, M. D., (2006), "Testing the use of aeromagnetic data for the determination of Curie depth in California", *Geophysics*. 71, 5, pp 51-59.

[13] Okubo, Y., Graf, R. J., Hansent, R. O., Ogawa, K. and Tsu, H., (1985), "Curie point depths of the island of Kyushu and surrounding areas Japan" *Geophysics*. 50, pp 481-494.

[14] Tanaka, A., Okubo, Y. and Matsubayashi, O., (1999), "Curie point depth based on spectrum analysis of magnetic anomaly data in East and Southeast Asia" *Tectonophysics*. 306, pp 461-470.

[15] Bansal, A. R., Gabriel, G., Dimri, V. P. and Krawczyk, C. M., (2011), "Estimation of depth to the bottom of magnetic sources by a modified centroid method for fractal distribution of sources: An application to aeromagnetic data in Germany" *Geophysics*. 76, 3, pp 11-22.

[16] Blakely, R. J., (1995), "*Potential theory in gravity and magnetic applications*"

Cambridge Univ. Press, Cambridge.

[۱۷] Ravat, D., (۲۰۰۴), "Constructing full spectrum potential-field anomalies for enhanced geodynamical analysis through integration of surveys from different platforms (INVITED), EOS, Trans. Am", *geophys. Un.* ۸۵، ۴۷، pp ۴۴-۴۹.

[۱۸] Fedi, M., Quarta, T. and De Santis, A., (۱۹۹۷), "Improvements to the Spector and Grant method of source depth estimation using the power law decay of magnetic field power spectra" *Geophysics*. ۶۲، pp ۱۱۴۳-۱۱۵۰.

[۱۹] Salem, A., Green, C., Ravat, D., Singh, K. H., East, P., Fairhead, J. D., Mogren, S. and Biegert, E., (۲۰۱۴), "Depth to Curie temperature across the central Red Sea from magnetic data using the de-fractal method" *Tectonophysics*, pp ۷۵-۸۶.

[۲۰] Bansal, A. R., Dimri, V. P., Kumar, Raj. and Anand, S. P., (۲۰۱۶), "Curie Depth Estimation from Aeromagnetic for Fractal Distribution of Sources", *Fractal Solutions for Understanding Complex Systems in Earth Sciences, Springer Earth System Sciences*.

[۲۱] Hisarli, Z. M., Dolmaz, M. N., Okyar, M., Etiz, A. and Orbay, N., (۲۰۱۱), "Investigation into regional thermal structure of the Thrace Region, NW Turkey, from aeromagnetic and borehole data", *Stud. Geophys. Geod.* ۵۶، pp ۲۶۹-۲۹۱.

[۲۲] خجملی. ا.، (۱۳۹۴)، رساله دکتری، "بهبود تعیین عمق نقطه کوری منابع مغناطیسی جهت

شناسایی مناطق مستعد انرژی زمین گرمایی"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۲۳] حجت. آ.، حسین زاده گویا، ن. و فاکس ماول، ک.، (۱۳۸۹)، "ارائه روشی جدید برای شناسایی

مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی با استفاده از مدل‌های ماهواره‌ای میدان مغناطیسی پوسته"، مجله

ژئوفیزیک ایران، جلد ۴، شماره ۱، صفحه ۳۳-۴۳.

[۲۴] کسایان، م.، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "شناسایی مناطق امیدبخش منابع زمین

گرمایی با تعیین عمق نقطه کوری و داده‌های جریان حرارتی در استان اردبیل"، دانشکده مهندسی

معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۲۵] بررسی صنعت نیروگاهی ایران در جهان، (۱۳۹۴)، "گزارش شرکت پاسارگاد تحلیل".

[۲۶] Hemant, K., Mitchell, A., (۲۰۰۹), "Magnetic field modelling and interpretation of the Himalayan Tibetan plateau and adjoining north Indian plains", *Tectonophysics*. ۴۷۸, pp ۸۷-۹۹.

[۲۷] Ravat, D., Salem, A., Abdelnaby, A., Elawdi, E. and Morgen, P., (۲۰۱۱), "Probing magnetic bottom and crustal temperature variations along the Red Seamargin of Egypt" *Tectonophysics*. ۵۱۰, pp ۳۳۷-۳۴۴.

[۲۸] Rajaram, M., Anand, S. P., Hemant, K. and Purucker, M. E., (۲۰۰۹), "Curie isotherm map of Indian subcontinent from satellite and aeromagnetic data", *Earth Planetary Sci Lett*. ۲۸۲ (۳-۴), pp ۱۴۷-۱۵۸.

[۲۹] Bhattacharyya, B. K., (۱۹۶۶), "Continuous spectrum of the total magnetic field anomaly due to a rectangular prismatic body" *Geophysics*. ۳۱, pp ۱۹۷-۲۱۲.

[۳۰] Salem, A., Green, C., Campbell, S., Fairhead, J. D., Cascone, L. and Moorhead, L., (۲۰۱۳), "Moho depth and sediment thickness estimation beneath the Red Sea derived from satellite and terrestrial gravity data" *Geophysics*. ۷۸, pp ۸۹-۱۰۱.

[۳۱] Smith, R. B., Shuey, R. T., Fridline, R. O., Otis, R. M. and Alley, L. B., (۱۹۷۴), "Yellowstone hot spot. New magnetic and seismic evidence", *Geology*. ۲, pp ۴۵۱-۴۵۵.

[۳۲] Boler, F. M., (۱۹۷۸), M.S. thesis, "Aeromagnetic measurements, magnetic source depths and Curie point isotherm in the Vale-Omyhee, Oregon" Oregon State Univ, Corvallis.

[۳۳] Connard, G., Couch, R. and Gemperle, M., (۱۹۸۳), "Analysis of Aeromagnetic Measurements from Cascade Range in Central Oregon" *Geophysics*. ۴۸, pp ۳۷۶-۳۹۰.

[۳۴] Finn, C. A. and Ravat, D., (۲۰۰۴), "Magnetic Depth Estimates and Their Potential for Constraining Crustal Composition and Heat Flow in Antarctica, EOS, Trans. Am" *Geophys.* ۸۵, ۴۷, pp ۱۲۳۶.

[۳۵] Ross, H. E., Blakely, R. J. and Zoback, M. D., (۲۰۰۴), "Testing the Utilization of Aeromagnetic Data for the Determination of Curie-Isotherm Depth" *EOS, Trans. Am. Geophys.* ۸۵, ۴۷, pp ۱۲۸۷.

[۳۶] Maus, S., Gordon, D. and Fairhead, D., (۱۹۹۷), "Curie temperature depth estimation using a self-similar magnetization model" *Geophys. J. Int.* ۱۲۹, pp ۱۶۳-۱۶۸.

[۳۷] امیرپور اصل، ا.، (۱۳۸۹)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "تهیه نقشه عمق کوری و نقشه گرادیان زمین گرمایی ایران"، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.

[۳۸] Stampolidis, A., Kane, I., Tsokas, G. N. and Tsourlos, P., (۲۰۰۵), "Curie point depths of Albania inferred from ground total field magnetic data", *Surv. Geophys.* ۲۶, pp ۴۶۱-۴۸۰.

[۳۹] Maus, S. and Dimri, V. P., (۱۹۹۴), "Scaling properties of potential fields due to scaling sources" *Geophys. Res. Lett.* ۲۱, pp ۸۹۱-۸۹۴.

[۴۰] Eletta, B. E. and Udensi, E. E., (۲۰۱۲), "Investigation of the Curie Point Isotherm from the Magnetic Fields of Eastern Sector of Central Nigeria" *Geoscience*. ۲۴, pp ۱۰۱-۱۰۶.

[۴۱] Ates, A., Bilim, F. and Buyuksarac, A., (۲۰۰۵), "Curie point Depth Investigation of Central Anatolia, Turkey" *Pure appl. Geophys.* ۱۶۲, pp ۳۵۷-۳۷۱.

[۴۲] Pilkington, M. and Todoeschuck, J. P., (۱۹۹۳), "Fractal magnetization of continental crust" *Geophys. Res. Lett.* ۲۰, pp ۶۲۷-۶۳۰.

[۴۳] نبوی، م. ح، ۱۳۵۵، **دیباجه‌ای بر زمین‌شناسی ایران**، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران.

[۴۴] آقاناتی، س. ع.، (۱۳۸۴)، **زمین‌شناسی ایران**، وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

[۴۵] نقشه‌ی ساده شده‌ی زمین‌شناسی ایران بر پایه‌ی سن، مدیریت ژئوماتیکس، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، وزارت صنایع و معادن ایران.

[۴۶] درویش‌زاده، ع.، (۱۳۷۰)، **زمین‌شناسی ایران**، نشر دانش امروز. (وابسته به مؤسسه انتشارات امیرکبیر) تهران.

[۴۷] حسامی، خ. و طبسی، ه.، ۱۳۸۲، **نقشه گسل‌های فعال ایران**، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، وزارت علوم، تحقیقات و فن‌آوری، تهران.

[۴۸] Manzella, L. and Conte, E., (۱۹۹۹) "Role of interferon regulatory factor ۱ in monocyte/macrophage differentiation" *European J. of Immunology*. ۲۹، ۹، pp ۳۰۰۹-۳۰۱۶.

[۴۹] گزارش سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۹۲).

[۵۰] Blakely, R. J., (۱۹۸۸), "Curie temperature isotherm analysis and tectonic

implications of aeromagnetic data from Nevada" J. Geophys. Res. ۹۳، ۱۱، pp ۸۳۲.

[۵۱] کسایان، م.، مرادزاده، ع.، خالوکاکایی، ر.، و آقاجانی، ح.، (۱۳۹۳)، "اکتشاف ذخایر زمین گرمایی از نقشه عمق کوری"، کنفرانس ملی علوم معدنی، صفحه ۹، ساری.

[۵۲] Khojamli, A., Dolati Ardejani, F., Moraszade, A., Nejati Kalate, A., Roshandel Kahoo, A. and Porkheil, S., (۲۰۱۵), "Determining fractal parameter and depth of magnetic sources for Ardabilgeothermal area using aeromagnetic data by de-fractal approach" *JME*, published online.

[۵۳] خوجم‌لی، ا.، دولتی ارده‌جانی، ف.، مرادزاده، ع.، نجاتی کلاته، ع.، پرخیال، س. و رحمانی، م. ر.، (۱۳۹۴)، "تحلیل طیفی داده‌های مغناطیس هوایی جهت اکتشاف پتانسیل‌های زمین گرمایی استان آذربایجان شرقی" مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۹، شماره ۴، صفحه ۹۴-۱۰۳.

[۵۴] Obande, G. E., Lawal, K. M. and Ahmed, L. A., (۲۰۱۴), "Spectral analysis of aeromagnetic data for geothermal investigation of Wikki Warm Spring, north-east Nigeria" *Geothermics*. ۵۰، pp ۸۵-۹۰.

[۵۵] کی‌نژاد، ص.، مختاری، ا.، فتحیان‌پور، ن. و ایران‌نژادی، م.، (۱۳۹۱)، "پتانسیل‌یابی منابع زمین گرمایی استان آذربایجان شرقی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی اکتشافی در محیط GIS"، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، جلد ۱، شماره ۳، صفحه ۱۰۵-۱۱.

Abstract:

Geothermal energy can be a good replacement for any kind of energy we have been using today. Estimation of Curie point depth (CPD) is one of the first steps in geothermal exploration. Using spectral analysis of aeromagnetic data can provide important information about temperature distribution in depth. Above the Curie temperature (580°C), magnetic minerals lose their ferromagnetism. This means that deeper layers at greater temperatures are essentially non-magnetic. The methods used to estimate CPD in different parts of the world, mostly consider the crustal rocks magnetization as a random function of the position (x, y) while the crustal rocks magnetization shows a fractal behavior. In this study we estimate the Curie point depth (CPD) assuming the crustal rock has a fractal behavior. To achieve this goal the reduced-to-pole aeromagnetic data were divided into 11 overlapping windows of the size of 100×100 km (overlapped 50% with the adjacent window). The 2D power spectrum of aeromagnetic data for each window was computed with fast Fourier transform (FFT) method. Then the top and bottom to the depth of magnetic sources estimate and bottom to the depth of magnetic sources assume as a Curie point depth. According to the results the depth to the top of magnetic sources estimate between 2.5 and 5.9 km. the depth to the bottom of magnetic sources estimate between 9.8 and 16.8 km and fractal parameter estimate between 2.1 and 3. Then by mapping the Curie point depth, thermal gradient and heat flow of study area we concluded that the all of study area has potential for more geothermal exploration.

Keywords: Curie point depth, Geothermal, Fractal parameter, Magnetic power spectra,



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.S.c Thesis in magnetics

The estimation of Curie point depth isotherm by using spectral
analysis of aeromagnetic data to explore the promising geothermal
resources in N-W of Iran

By: Peyvand Heidarnejad Sanami

Supervisor:

Dr. Ali Nejati Kalate

Advisor:

Dr. Hani Motevalli Anbaran

January 2017